



Titre: Évaluation de la vulnérabilité d'une ville face à son réseau d'eau
Title: potable : une approche par conséquences

Auteur: Romain Boudou
Author:

Date: 2006

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Boudou, R. (2006). Évaluation de la vulnérabilité d'une ville face à son réseau
Citation: d'eau potable : une approche par conséquences [Mémoire de maîtrise, École
Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/7866/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/7866/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:**
Advisors:

Programme: Non spécifié
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ D'UNE VILLE FACE À SON RÉSEAU
D'EAU POTABLE : UNE APPROCHE PAR CONSÉQUENCES

ROMAIN BOUDOU
DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE CIVIL)
SEPTEMBRE 2006

© Romain Boudou, 2006



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 978-0-494-19283-2

Our file Notre référence

ISBN: 978-0-494-19283-2

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.


Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ D'UNE VILLE FACE À SON RÉSEAU
D'EAU POTABLE : UNE APPROCHE PAR CONSÉQUENCES

Présenté par : BOUDOU Romain

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. DESJARDINS Raymond, Ph.D., président

Mme PRÉVOST Michèle, Ph.D., membre et directrice de recherche

M. ROBERT Benoît, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

Mme MORISSETTE Chantal, M.Sc.A., membre

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier particulièrement mes deux codirecteurs, Mme Michèle Prévost et M. Benoît Robert, qui m'ont permis de travailler sur le sujet qui m'intéressait et qui rentrait dans le cadre de ma formation d'ingénieur en bâtiment et travaux publics. Leurs remarques avisées ainsi que leurs points de vue pertinents m'ont bien orienté tout au long de ma recherche. Je les remercie également de m'avoir accueilli au sein de leurs équipes respectives : la Chaire Industrielle CRSNG en Eau Potable de l'École Polytechnique de Montréal et le Centre risque & performance. Les partenaires industriels de la chaire sont la Ville de Montréal, la Ville de Laval et John Meunier Inc. Merci également à Mme Chantal Morissette et M. Raymond Desjardins de s'être intéressés à ma recherche.

Je souhaite également remercier M. Frédéric Petit pour son aide et sa disponibilité. Ses commentaires m'ont permis de mener à bien mon étude.

Je tiens aussi à remercier Mme Marie-Claude Besner pour sa gentillesse et son professionnalisme.

Mes remerciements s'adressent également à M. Luciano Morabito pour m'avoir conseillé et fourni des documents nécessaires à ma maîtrise, ainsi qu'à Mme Chantal Morissette et M. Mario Lewis de la ville de Montréal qui m'ont fourni les données relatives à ma recherche.

Enfin, je souhaite remercier tous mes camarades de la Chaire en eau potable avec qui j'ai passé de très bons moments. Cette maîtrise n'aurait pas été aussi agréable à réaliser si un esprit de cohésion et d'amitié tel que celui trouvé dans cette équipe n'était pas présent. Je tiens finalement à remercier ma famille et mon entourage pour leurs soutiens inconditionnels et leurs encouragements qui m'ont permis de mener à bien cette étude.

RÉSUMÉ

Le réseau de distribution d'eau potable fait partie des Infrastructures Essentielles (IE) d'une municipalité. Son rôle est primordial dans l'approvisionnement et la distribution d'eau potable, non seulement pour la population, mais également pour les autres IE. Ainsi, il est nécessaire de s'assurer de son bon fonctionnement en mettant en place des plans de réhabilitation de ses conduites.

Malheureusement, le peu de méthodes actuelles permettant l'élaboration de ces plans requièrent un niveau de connaissance du réseau d'eau potable assez élevé. Les municipalités qui, pour différentes raisons, ont délaissé l'entretien et le suivi des réseaux d'eau éprouvent des difficultés à mettre en place ces méthodes, difficultés principalement liées à la recherche de données nécessaires aux méthodes. De plus, les méthodes actuelles ne permettent pas de prendre en compte l'aspect du risque de dysfonctionnements encourus par les autres IE à la suite de défaillances survenues sur le réseau d'eau potable. Or, le bon fonctionnement de certaines conduites du réseau est essentiel à certaines IE.

Cette étude propose une démarche d'analyse de risque, basée sur une approche par conséquences, qui permet de hiérarchiser les interventions à réaliser sur les conduites du réseau d'eau potable afin de minimiser les risques de défaillances des autres IE d'une municipalité. Cette démarche se compose de différentes étapes successives au cours desquelles (i) une problématique est choisie (étude d'une IE vis-à-vis d'une mission réseau d'eau), (ii) une décomposition de l'IE en éléments et leur hiérarchisation est obtenue, (iii) la vulnérabilité des éléments de l'IE face à une défaillance de la mission réseau d'eau est évaluée et caractérisée par le biais de courbes de conséquences, (iv) les sources potentielles et les phénomènes responsables des accidents sur le réseau d'eau menant aux défaillances des éléments de l'IE sont identifiés et enfin, (v) des zones ou

conduites du réseau d'eau potable sont hiérarchisées en fonction de leurs potentiels à causer des dysfonctionnements sur l'IE desservie.

Grâce à sa flexibilité et sa multidisciplinarité, cette démarche permet d'obtenir une hiérarchisation des conduites à réhabiliter ou remplacer sans nécessiter l'obtention de données trop spécifiques au réseau d'eau potable. De plus, la mise en place de courbes de conséquences pour caractériser la vulnérabilité des IE face au réseau d'eau potable permet de structurer les connaissances et ainsi d'améliorer la gestion des situations d'urgences.

Une application de la démarche a été réalisée pour un hôpital, élément de l'IE Santé, face à la mission Qualité du réseau d'eau potable. Cela a permis de montrer jusqu'à quels niveaux de réflexions cette démarche peut conduire. Il serait intéressant par la suite de pouvoir jumeler cette approche, qui tient compte des risques sur les IE et donne des hiérarchisations de réhabilitations de conduites à court et moyen termes, avec les planifications des plans de renouvellement des réseaux.

ABSTRACT

The water distribution system is one of the critical infrastructures of a municipality. Its role is essential to the supply and distribution of drinkable water, not only for the populations, but also for the other critical infrastructures. Therefore, it is important to insure its good operation by using useful rehabilitation plans of water mains.

Unfortunately, the few existing methods that allow the elaboration of such plans require a high level of knowledge of the water network. Municipalities which, for different reasons, have been neglecting maintenance activities are now experiencing difficulties to implement these methods, due to the data research they require. Besides, the current methods do not take into consideration the risk of malfunction for the others critical infrastructures in the event of a failure of the distribution water system. Indeed, the proper operation of some pipes of the network may be essential to some critical infrastructures.

This study proposes a risk analysis approach, based on a consequential approach, in order to prioritize the interventions that must be done to the pipes of the water distribution system in order to minimize the risks of failure, linked to the water network and their impact on critical infrastructures of a municipality. This approach is composed of several successive steps : (i) choice of a problematic (study of one critical infrastructure related to a water network mission), (ii) breakdown of the critical infrastructure into separate elements and analysis of their hierarchical organisation, (iii) evaluation and characterization of the vulnerability of those elements of the critical infrastructure in case of a failure of the water network mission by construction of consequences curves, (iv) identification of sources and phenomena potentially responsible for the accidents on the water network and potentially leading to the failures of the elements of the critical infrastructure and finally, (v) classification of the areas or water pipes based on their potential to cause malfunctions to the critical infrastructure.

Because this approach is flexible and multidisciplinary, it allows for a classification of the pipes in order to rehabilitate or renew them without having to obtain specific data about the water network. Moreover, the construction of consequences' curves allows to characterize the vulnerability of critical infrastructures caused by the water network and to structure the knowledge and therefore to improve the management of emergency situations.

We have illustrated this approach with the study of one hospital, element of the Health critical infrastructure, in relationship with the Quality mission of the distribution water system. This has shown the levels of reflexions this approach could reach. In the future, it would be interesting to use such an approach, which takes into consideration both the risks to critical infrastructures and a classification of the pipes to be rehabilitated in the short and medium terms, with distribution system renewal plans.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT.....	VII
TABLE DES MATIÈRES	IX
LISTE DES TABLEAUX.....	XII
LISTE DES FIGURES	XIII
LISTE DES ABRÉVIATIONS	XV
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 2 MISE EN CONTEXTE	4
2.1 Les villes et les Infrastructures Essentielles.....	4
2.1.1 Les Infrastructures Essentielles au Canada et aux États-Unis	4
2.1.2 Des réseaux de support à la vie	6
2.1.3 Le cadre de l'étude	7
2.2 Utilité de l'analyse et de la gestion du risque sur le réseau de distribution d'eau potable	8
2.2.1 Les problèmes de contaminations	8
2.2.2 Les conséquences de ruptures de conduites	10
2.3 Modèles d'Analyse des risques dans les réseaux d'eau potable	13
2.3.1 Les Infrastructures Essentielles et l'eau potable	13
2.3.2 Survol de l'état des réseaux de distribution d'eau potable.....	14
2.3.3 Les méthodes communes de planifications de remplacements de conduites.	18
2.3.4 HACCP et la qualité.....	26
2.3.5 La nécessité d'une nouvelle approche.....	28
CHAPITRE 3 OBJECTIFS DE RECHERCHE	32
CHAPITRE 4 DÉMARCHE D'ANALYSE DE RISQUE PROPOSÉE : UNE APPROCHE PAR CONSÉQUENCES	33
4.1 Présentation de la démarche.....	33

4.1.1	Notion de vulnérabilité.....	33
4.1.2	Intérêts et utilité de l'approche par conséquences.....	34
4.1.3	Schéma de présentation de la démarche globale.....	35
4.2	Choix d'une problématique.....	38
4.2.1	Nécessité d'étudier chaque Infrastructure Essentielle de façon séparée..	38
4.2.2	Nécessité d'étudier une mission réseau à la fois.....	38
4.2.3	Précisions supplémentaires sur l'étude	39
4.3	étude de l'infrastructure essentielle choisie	40
4.3.1	Des informations à collecter.....	40
4.3.2	Hierarchisation des éléments.....	41
4.4	vulnérabilité de l'infrastructure essentielle par rapport à la mission réseau	43
4.4.1	Sélection des éléments sensibles à la mission réseau étudiée	43
4.4.2	Caractérisation de la vulnérabilité des éléments face à la mission réseau considérée	44
4.5	étude du réseau d'eau potable	46
4.5.1	Identification des sources des problèmes liés au réseau d'eau potable....	46
4.5.2	Identification des facteurs externes au réseau d'eau potable	49
4.6	Synthèse des données	50
4.6.1	Obtention de critères	50
4.6.2	Analyse des résultats	52
CHAPITRE 5 ILLUSTRATION DE LA DÉMARCHE D'ANALYSE DE RISQUE.....		54
5.1	Choix de la problématique et étude de l'Infrastructure essentielle choisie.....	54
5.1.1	La problématique	54
5.1.2	Étude de l'Infrastructure Essentielle choisie.....	55
5.2	Vulnérabilité de l'infrastructure essentielle par rapport à la mission qualité...	55
5.2.1	Sélection des éléments sensibles à la mission Qualité	55
5.2.2	Caractérisation de la vulnérabilité des éléments face à la mission Qualité.....	57

5.3	étude du réseau d'eau potable	72
5.3.1	Identification des sources des problèmes de qualité liés au réseau d'eau potable	72
5.3.2	Les facteurs externes	80
5.4	Synthèse	84
5.4.1	Critères obtenus.....	84
5.4.2	Analyse des résultats et hiérarchisation finale proposée.....	105
5.4.3	« Remontée » de la chaîne des conséquences	109
5.4.4	Retour sur l'approche globale	110
CHAPITRE 6	CONCLUSION.....	117
REFERENCES.....		120

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Indicateurs de l'état ou du comportement d'un réseau de distribution d'eau (Guide National pour des Infrastructures Municipales Durables (InfraGuide) 2003).	21
Tableau 4.1 : Exemple de découpage d'une IE en éléments.....	41
Tableau 4.2 : Perturbations engendrées par le non-respect des missions réseau.	43
Tableau 4.3 : Évènements sur le réseau entraînant le non-respect des missions réseau. .	47
Tableau 5.1 : Qualité d'eau requise pour les opérations d'endoscopie digestive (adapté de Ministère de la Santé et des Solidarités 2005).....	57
Tableau 5.2 : Données sur les courbes dose-réponse de quelques contaminants (adapté de Haas <i>et al.</i> (1999)).	64
Tableau 5.3 : Points d'entrée de contaminants et niveaux de risque (adapté de Kirmeyer <i>et al.</i> 2001).	74
Tableau 5.4 : Concentrations moyennes des organismes dans les égouts (adapté de Tchobanoglous <i>et al.</i> (2003)).	81
Tableau 5.5 : Durées de survie des organismes (adapté de Tchobanoglous <i>et al.</i> 2003). .	82
Tableau 5.6 : Essais de différentes durées et heures d'intrusions.	96
Tableau 5.7 Classement des nœuds d'intrusion suivant leur potentiel à amener des contaminants aux nœuds A et B.....	99
Tableau 5.8 : Vies utiles (en années) de conduites suivant leurs matériaux (adapté de Martin (2005)).	104

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Schématisation de la caractérisation d'un réseau de support à la vie (Robert <i>et al.</i> 2004).	6
Figure 2.2 : Le boulevard McKnight au matin, après la rupture d'une conduite de 1 200 mm (Spelay et Sharp 2004).	11
Figure 2.3 : Répartition des capitaux d'une municipalité (Cromwell <i>et al.</i> 2001).	16
Figure 2.4 : Courbe de détérioration d'une infrastructure (traduite de Lemer 2000).	22
Figure 2.5 : Les courbes Nessie (Cromwell <i>et al.</i> 2001).	25
Figure 4.1 : Illustration de la notion de vulnérabilité (figure adaptée de Reason 2000). 34	
Figure 4.2 : Schématisation de l'approche par conséquence sur la VIE (Ville et Infrastructures Essentielles) vis-à-vis du réseau d'eau potable.	37
Figure 4.3 : L'IE constituée d'éléments classés par ordre d'importance.	42
Figure 4.4 : Représentation générale des courbes de conséquences.	45
Figure 4.5 : Étapes pour la caractérisations de zones de dangers	51
Figure 5.1 : Courbe de conséquences reliant le personnel et le niveau de fonctionnement d'un hôpital.	59
Figure 5.2 : Doses médianes d'infection pour différents organismes (adapté de Crittenden <i>et al.</i> 2005).	63
Figure 5.3 : Courbe dose-réponse des <i>rotavirus</i> (tiré de Haas <i>et al.</i> 1999).	66
Figure 5.4 : Courbes dose-réponse pour <i>Shigella</i> (tiré de Haas <i>et al.</i> 1999).	67
Figure 5.5 : Courbes dose-réponse pour <i>Vibrio cholerae</i> (tiré de Haas <i>et al.</i> 1999).	68
Figure 5.6 : Courbes dose-réponse pour <i>Cryptosporidium parvum</i> (tiré de United States Environmental Protection Agency (USEPA) 2003).	69
Figure 5.7 : Courbes dose-réponse pour <i>Giardia</i> (tiré de Barbeau <i>et al.</i> 2000).	69
Figure 5.8 : Ct requis pour 99% d'inactivation suivant différents désinfectants (adapté de Crittenden <i>et al.</i> 2005).	78
Figure 5.9 : Schéma du réseau d'alimentation en eau potable de l'hôpital H.	87

Figure 5.10 : Coefficients multiplicatifs suivant les heures d'une journée (adapté du logiciel EPANET).	91
Figure 5.11 : Schéma du sens théorique d'écoulement de l'eau dans les conduites en régime permanent.....	92
Figure 5.12 : Schéma du réseau d'égouts sur la zone étudiée.....	101
Figure 5.13 : Conduite d'égout en briques et ciment 2'x 3' ovoïdale, venant d'être réhabilitée (Ville de Montréal 2006).....	102
Figure 5.14 : Hiérarchisation des conduites selon leur degré de criticité pour l'hôpital H	108

LISTE DES ABRÉVIATIONS

AWWA: American Water Works Association

AWWARF: American Water Works Association Research Foundation

CERIU : Centre d'Expertise et de Recherche en Infrastructures Urbaines

CRSNG : Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada

CWS : Contaminant Warning Systems

GIS : Geographic Information Systems

HACCP : Hazard Analysis of Critical Control Points

IE : Infrastructure Essentielle

MSPCC : Ministère de la Sécurité Publique et de la Protection Civile du Canada

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

USEPA: United States Environmental Protection Agency

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Le réseau de distribution d'eau potable est une infrastructure clé d'une municipalité. Cette infrastructure permet d'alimenter et de distribuer de l'eau potable à tous les habitants et tous les services et industries présents dans les milieux urbains. Par conséquent, elle fait partie des Infrastructures Essentielles (IE) (Robert *et al.* 2003), vitale non seulement pour le bon fonctionnement des villes mais aussi pour le rôle majeur que l'eau tient dans la vie de tous les jours. En effet, l'eau occupe une place importante dans la vie de chacun, que ce soit dans un pays en voie de développement ou déjà industrialisé. Son rôle est multiple, touchant aussi bien le secteur alimentaire que celui de l'hygiène, mais également celui de l'industrie à travers les différents équipements qui dépendent directement d'un approvisionnement en eau. Ainsi, il est nécessaire de s'assurer du bon fonctionnement du réseau de distribution d'eau potable.

Pour éviter tout problème majeur vis-à-vis de la distribution de l'eau, il faut surveiller et entretenir convenablement l'ensemble des conduites qui assurent la desserte en eau potable. Ces conduites doivent être suffisamment en bon état pour répondre à des critères structural (elles doivent être capables de résister aux sollicitations extérieures comme les passages de véhicules, le poids de la chaussée, etc.), hydraulique (elles doivent être dimensionnées correctement afin d'alimenter en quantité suffisante les usagers, et résister aux pressions nécessaires à différents usages (incendies notamment)) et d'intégrité (aucune intrusion d'eau non traitée ne doit pénétrer le réseau).

Cependant, comme ce réseau d'infrastructures est généralement enfoui, certaines municipalités ont reporté ce travail d'entretien et de surveillance au profit d'autres projets. Les problèmes pouvant se produire sur ce réseau n'étant pas forcément apparents (l'eau qui sort des fuites du réseau ne remonte pas toujours en surface), plusieurs municipalités à travers le monde ont cru qu'elles pouvaient reporter cet entretien à plus tard. Ou plus simplement, le manque de connaissances et le fait

qu'entretenir un réseau souterrain est onéreux ont poussé certaines municipalités à mettre de côté ce problème (Cromwell *et al.* 2001). Aujourd'hui, ce manque de suivi et d'entretien pose un problème majeur aux municipalités, problème dont l'ampleur va nécessiter une grande mobilisation de moyens financiers et humains. En effet, le manque d'entretien et de suivi se traduit non seulement par l'absence de remplacement de conduites ayant atteint leur fin de vie utile, mais aussi par la réduction de la vie utile d'une majorité de conduites qu'il va falloir remplacer ou réhabiliter en urgence. De plus, certaines périodes de croissance intense, comme la période d'après Guerre, années au cours desquelles les municipalités connurent un essor démographique important, viennent ajouter un poids supplémentaire au phénomène. Non seulement la négligence dans l'entretien des conduites va nécessiter une grande mobilisation des ressources des sociétés actuelles, mais les « booms » passés de constructions vont entraîner un grand nombre de conduites à réparer sur une période assez courte (Cromwell *et al.* 2001). Le cas de la ville de Montréal résume bien la situation : en 2002, 33% des conduites du réseau de la ville avaient déjà dépassé leur durée de vie utile et ce pourcentage s'élèvera à 67% d'ici 2020 (Consortium SNC-Lavalin/Dessau-Soprin 2002).

Ce problème d'entretien insuffisant du réseau n'est certainement pas à négliger. De nombreux exemples en ont montré les conséquences. Des ruptures de conduites de grands diamètres peuvent avoir différentes conséquences : des milliers de personnes et des Infrastructures Essentielles peuvent être privées d'eau potable, des contaminations peuvent avoir lieu par intrusion d'agents pathogènes dans le réseau, de véritables torrents peuvent inonder et bloquer des artères des villes, etc. Ces premières conséquences peuvent devenir la cause de problèmes supplémentaires. À la suite d'une rupture de conduite, un secteur peut être privé d'eau. Si une usine d'électricité présente sur le secteur n'est plus alimentée en eau, son fonctionnement risque d'être affecté et donc la rupture de conduite pourrait mener non seulement à un arrêt en approvisionnement en eau sur le secteur, mais aussi en électricité.

Ainsi, les conséquences des problèmes de sous-entretien du réseau peuvent être catastrophiques. Pour remédier à cela, il est judicieux de vouloir mettre en place des plans d'interventions pour réhabiliter les conduites. Cependant, les méthodologies disponibles demandent beaucoup de données sur le réseau, données étant le plus souvent indisponibles ou non actualisées dû au manque de suivi passé. De plus, ces méthodes se concentrent sur le réseau principalement et ne tiennent pas forcément compte de l'aspect stratégique que peuvent avoir certaines conduites, notamment celles desservant des Infrastructures Essentielles (IE) (Ezell 2002). Enfin, si les municipalités envisageaient d'utiliser ces méthodes, cela nécessiterait beaucoup de capitaux et de temps pour acquérir les données. C'est pourquoi, il apparaît utile de développer une démarche d'analyse de risque, basée sur une approche par conséquences, qui puisse hiérarchiser les interventions à réaliser sur les conduites du réseau d'eau potable afin de minimiser les risques de problèmes liés au réseau d'eau sur les IE d'une municipalité.

L'approche par conséquence permet de localiser les points clés de la ville, puis de « remonter » vers les événements qui peuvent causer, sur le réseau, des problèmes qui mettraient hors service ces IE. L'usage d'une telle démarche permettrait aux municipalités qui sont contraintes à utiliser des méthodes réactives face aux problèmes posés par le réseau, de passer à une méthode préventive à court ou moyen terme sur les IE. Elles pourraient ensuite recueillir les données nécessaires à la mise en place de méthodes à long terme de gestion du renouvellement du réseau d'eau potable.

Le présent document établi, dans le chapitre 2, le contexte global dans lequel cette étude a été effectuée. Le chapitre 3 présente les objectifs généraux et spécifiques de la démarche d'analyse de risque proposée, puis le 4^{ème} chapitre s'intéresse au développement de ses composantes principales. Enfin, le chapitre 5 donne une illustration des possibilités qu'offre la démarche à travers l'étude d'un hôpital avec un objectif de maintien de la mission Qualité du réseau d'eau potable.

CHAPITRE 2 MISE EN CONTEXTE

2.1 LES VILLES ET LES INFRASTRUCTURES ESSENTIELLES

2.1.1 Les Infrastructures Essentielles au Canada et aux États-Unis

La plupart des villes sont constituées de multitudes de réseaux d'infrastructures, imbriqués les uns aux autres et ayant différents types de rapports entre eux. Certains pays ont entrepris de classer ces infrastructures en rassemblant certaines sous le terme d'Infrastructures Essentielles (IE).

Au Canada, selon le Ministère de Sécurité Publique et de Protection Civile Canadienne (MSPPCC), les IE "se composent des installations matérielles et des technologies de l'information, des réseaux et des biens matériels dont la perturbation et la destruction auraient de sérieuses conséquences pour la santé, la sécurité ou le bien-être économique des Canadiennes et des Canadiens ou le fonctionnement efficace des gouvernements au Canada" (Robert *et al.* 2003). Aux États-Unis, les IE sont "des systèmes et des actifs, physiques ou virtuels, dont l'importance est telle que la destruction totale ou partielle de ces derniers aurait un impact grave sur la sécurité, la sécurité économique, la santé publique, ou tout autre combinaison de ces domaines" (The White House Washington 2003, traduction libre du USA Patriot Act).

En 2004, les Infrastructures Essentielles retenues par le MSPPCC étaient les suivantes :

- Énergie et services publics : la transmission et la production de l'électricité (génération, transmission, nucléaire), du gaz et des hydrocarbures ;
- Communications et technologies de l'information : les télécommunications (téléphone, télécopieur, câble, satellites), la radiodiffusion, les logiciels, les matériels et les réseaux (Internet) ;
- Finances : les opérations bancaires, les valeurs et l'investissement ;

- Santé : les hôpitaux, les établissements de santé, les réserves de sang, les laboratoires, les produits pharmaceutiques ;
- Alimentation : la salubrité des aliments, l'agriculture, l'industrie alimentaire et la distribution alimentaire ;
- Eau : la gestion, la collecte, le traitement et la distribution d'eau potable et usée ;
- Transports : par voies aériennes, ferroviaires, marines et terrestres ;
- Sécurité : la sécurité chimique, biologique, radiologique et nucléaire, les matières dangereuses, la recherche et le sauvetage et les services d'urgence (police, incendie, ambulance et autres), les barrages ;
- Gouvernement : les installations, les services (par exemple les services météorologiques), les réseaux d'information, les biens, les symboles nationaux clés (institutions culturelles et les sites et monuments nationaux) du gouvernement ;
- Fabrication : l'industrie chimique, l'infrastructure industrielle de défense.

(Robert *et al.* 2003) (Ministère de la Sécurité Publique et de la Protection Civile du Canada (MSPPCC) 2005)

De son côté, le Department of Homeland Security a également recensé les principaux secteurs de ces infrastructures clés en 2003 : l'agriculture et l'alimentation, l'eau, la santé publique, les services d'urgences, les bases industrielles de défense, les télécommunications, l'énergie, les transports, les services bancaires et financiers, les matériaux chimiques et dangereux, les postes et les services d'expéditions. Les monuments nationaux et symboliques, les centrales nucléaires, les barrages, les édifices gouvernementaux et les actifs commerciaux clés ont été rajoutés à la liste précédente après les attentats du World Trade Center, en 2001 (The White House Washington 2003). Ainsi, que ce soit du côté canadien ou américain, les IE sont bien définies et globalement, l'approche de ces 2 pays vis-à-vis de leurs IE est similaire.

2.1.2 Des réseaux de support à la vie

L'ensemble de ces IE constitue de véritables réseaux de support à la vie. Un réseau peut être défini comme deux principes distincts :

- ensemble d'infrastructures et de liens qui se ramifient et s'entrecroisent physiquement ou virtuellement (réseaux de distributions des eaux, téléphonique, etc.) ;
- ensemble d'infrastructures réparties sur un territoire donné, en relation directes ou indirectes les unes avec les autres et régies généralement par des directives similaires (réseaux hospitaliers, d'alimentation, routier, etc.).

Les réseaux de support à la vie remplissent des missions primordiales pour le bon fonctionnement d'une société, en assurant des services essentiels sur le plan de la santé, de la sécurité des populations et le bon fonctionnement de l'économie. Le *Centre risque & performance* a identifié 17 réseaux de support à la vie (Robert *et al.* 2003) ; il s'agit des réseaux : électrique, de télécommunication, informatique, de transport en commun, de gaz naturel, de carburants liquides, ferroviaire, maritime, d'eaux usées, d'eau potable, d'alimentation, de la santé, routier, aéroportuaire, financier, de la sécurité publique, gouvernemental. La Figure 2.1 présente un schéma de fonctionnement global des réseaux de support à la vie composés d'infrastructures et d'opérations dédiées à la réalisation de missions.

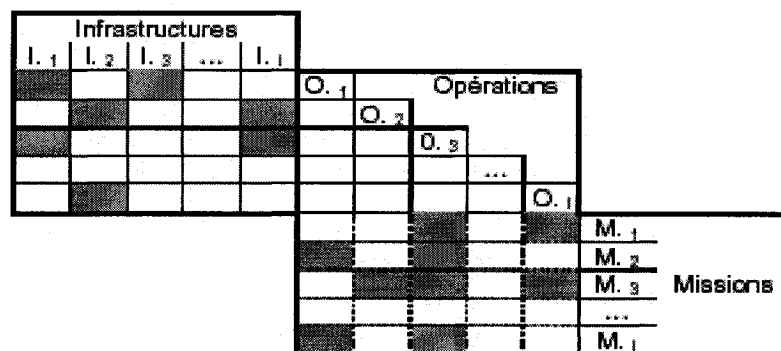


Figure 2.1 : Schématisation de la caractérisation d'un réseau de support à la vie (Robert *et al.* 2004).

Les infrastructures correspondent à des ouvrages, installations, bâtiments, équipements nécessaires à la réalisation d'opérations (Robert *et al.* 2003). Les opérations sont des processus techniques permettant des actions directes ou indirectes, manuelles ou automatisées, sur l'ensemble ou des parties du réseau afin de réaliser des missions. Les missions du réseau de support à la vie correspondent aux fonctions pour lesquelles il a été conçu et construit. Ces trois aspects sont dépendants et tous les réseaux de support à la vie peuvent se décomposer ainsi. Par exemple, il est possible de décomposer le réseau d'eau potable de cette manière :

- missions : maintenir une eau de qualité pour la consommation humaine, fournir de l'eau (volumes et pressions) pour le contrôle des incendies ;
- infrastructures : canalisations, filtres, ozoneurs, réservoirs, pompes, etc. ;
- opérations : pompage, maintenance des pompes, traitement, détections des fuites, vidanges des réservoirs, des conduites, etc.

Ainsi, pour remplir la mission « maintenir et fournir une eau de qualité pour la consommation humaine », des infrastructures sont nécessaires comme les usines de traitement de l'eau potable et le réseau de distribution. Pour mener à bien cette mission dans le temps, des opérations de pompage, de traitement et d'entretiens sur les usines et le réseau de conduites sont nécessaires.

2.1.3 Le cadre de l'étude

Le but de cette étude est de proposer une démarche d'analyse de risque qui permette d'appréhender et de caractériser les problèmes qui pourraient survenir sur des IE à la suite d'une dysfonction du réseau d'eau potable. Le terme « réseau d'eau potable » englobe l'ensemble des infrastructures et opérations qui assurent les missions d'alimentation, de traitement et de distribution en eau potable de la population. Afin de restreindre l'ampleur de l'étude, il a été choisi de s'intéresser plus spécifiquement aux conduites du réseau de distribution de l'eau potable, l'un des éléments les plus coûteux (American Water Works Association (AWWA) 2001). La démarche proposée devra

permettre de caractériser les relations liant les IE d'une ville ou municipalité avec les conduites des réseaux de distribution d'eau potable. Il faudra s'interroger sur les missions d'un réseau de conduites et sur l'effet pour les autres IE du non-respect de ces missions. L'objectif final de cette démarche d'analyse de risque est de proposer une hiérarchisation des conduites à réhabiliter qui tienne compte des risques encourus par les autres IE, suite à un dysfonctionnement du réseau de distribution d'eau potable.

Quelle est l'utilité d'une telle démarche d'analyse de risque sur les conduites des réseaux de distribution d'eau potable ? Les exemples qui suivent vont souligner l'intérêt d'entreprendre une telle démarche.

2.2 UTILITÉ DE L'ANALYSE ET DE LA GESTION DU RISQUE SUR LE RÉSEAU DE DISTRIBUTION D'EAU POTABLE

Le réseau de distribution est un maillon essentiel de la chaîne du système d'eau potable d'une ville. C'est à travers ses conduites que l'eau potable est desservie aux populations et, comme pour les autres réseaux de support à la vie, le moindre problème l'affectant peut se transformer en catastrophe dans certaines situations.

2.2.1 Les problèmes de contaminations

De nombreux problèmes de contamination de l'eau potable sont dus à une défaillance du système de traitement de l'eau. Néanmoins, les conduites du réseau de distribution peuvent, elles aussi, être la source de contaminations.

L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) est consciente de l'ampleur des problèmes pouvant être causés par des défaillances des réseaux de conduites d'eau potable. De 1920 à 1990, 11 à 18% des épidémies de maladies hydriques seraient liées à des contaminations de réseaux de distribution d'eau potable et de 1991 à 1996, ce pourcentage atteindrait 22% (Ainsworth 2004). Au Royaume Uni, 36% des épidémies de

maladies hydriques seraient dues à ce type de contaminations. Ces contaminations ont différentes sources : la corrosion des conduites, des reflux, des connections fautives, de mauvais entretiens de réservoirs ou de mauvaises réparations de canalisations, etc.

Les contaminations liées aux défaillances des conduites peuvent avoir des conséquences tragiques. Ainsi, en janvier 1991, le Pérou a connu une grave crise due à la présence du virus du choléra dans le réseau de distribution de la deuxième ville du pays, Trujillo (Ainsworth 2004). La contamination se serait répandue grâce aux nombreuses chutes de pressions, aux connections fautives, et au fait qu'aucun niveau de désinfectant résiduel n'ait été maintenu dans le réseau. Le résultat : 533 000 cas de choléra dont 4700 mortels.

Les graves contaminations de l'eau potable ne sont pas l'apanage des pays en développement. L'état américain du Missouri a connu une contamination à l'*Escherichia coli* O157:H7 à la suite d'une réparation sur une conduite principale de la petite municipalité rurale de Cabool (2090 habitants) qui a causé 243 cas de diarrhées dont 86 étaient sanglantes, 32 hospitalisations et 4 décès (Ainsworth 2004). La non chloration du réseau aurait permis le développement de l'épidémie.

Si la présence d'une concentration résiduelle de désinfectant au sein des conduites du réseau d'une ville semble être une bonne prévention de ces problèmes de contaminations, son efficacité à inactiver certains organismes pathogènes est encore à l'étude. Payment (1999) a tenté de déterminer le potentiel d'inactivation du chlore résiduel présent dans l'eau des réseaux. Ses résultats tendent à montrer qu'une concentration en chlore résiduel ne procure pas une protection réelle contre certains organismes. Ces différents exemples font apparaître 3 aspects clés liés aux contaminations qui sont : leurs fréquences, leurs ampleurs au niveau du risque sanitaire pour les populations et enfin l'efficacité des désinfectants résiduels à éliminer ou atténuer ces contaminants. L'application de la démarche d'analyse de risque proposée au

chapitre 5 a pour objectif d'étudier la mission Qualité d'un réseau de distribution d'eau potable. Ces différents aspects seront alors développés plus en détails (§5.3.1).

2.2.2 Les conséquences de ruptures de conduites

Deux exemples sont développés dans le but de montrer jusqu'à quel point un réseau d'eau potable peut être vital pour la santé publique et le bon fonctionnement d'une ville.

Le premier accident s'est produit à Montréal, sur la rue Pie IX, le 13 août 2002 (Fortin 2002). Une conduite principale de plus d'un mètre de diamètre en acier et béton s'est brisée alors qu'elle avait atteint le quart de sa vie utile (posée en 1974, elle était conçue pour 100 ans). Une population de 22 000 habitants a été privée d'eau pendant plusieurs jours car il a fallu huit jours pour remettre en service la conduite. Une fois l'eau courante rétablie, elle n'était pas pour autant potable étant donné les risques élevés de contaminations dus aux intrusions très probables d'eaux externes au réseau ou de sédiments. Des analyses bactériologiques ont été effectuées afin de s'assurer de sa potabilité et une sur-chloration de la nouvelle conduite a été faite. Les habitants ont été avisés de faire bouillir l'eau pendant cinq minutes avant de la consommer (Info Branchez-vous 2002). Parallèlement à ces mesures, les montréalais ont été priés de limiter leurs consommation d'eau malgré la canicule afin de pouvoir mettre sous pression une partie des secteurs touchés grâce au maillage du réseau de conduites. Le maillage a permis de mettre en place des déviations et de contourner la zone de l'accident pour alimenter une partie des secteurs desservis par la conduite brisée. À ces problèmes, d'autres sont venus s'ajouter : logements inondés, coupures de courant, etc. Des hébergements temporaires ont dû être mis en place afin d'accueillir les sinistrés, les centres aquatiques ont prolongé leurs heures d'ouvertures pour faciliter l'accès aux douches et toilettes, etc.

L'incident qui s'est produit en janvier 2004 à Calgary est particulièrement représentatif des ennuis qui peuvent découler d'une rupture de canalisation. La revue Opflow (Spelay

et Sharp 2004) de juin 2004 résume ces événements. Une conduite de 1200 mm de diamètre s'est rompue au dessous du boulevard McKnight, une artère principale de la ville. Les services de distributions d'eau potable ont été avertis tôt le matin qu'un torrent empêchait toute circulation sur le boulevard. Le centre d'appels d'urgences était débordé car de nombreux résidents et entreprises n'étaient plus desservis en eau. Les quatre voies du boulevard étaient complètement sous les flots comme le montre la Figure 2.2, où la zone sombre du milieu est en réalité le toit d'une automobile complètement immergée.

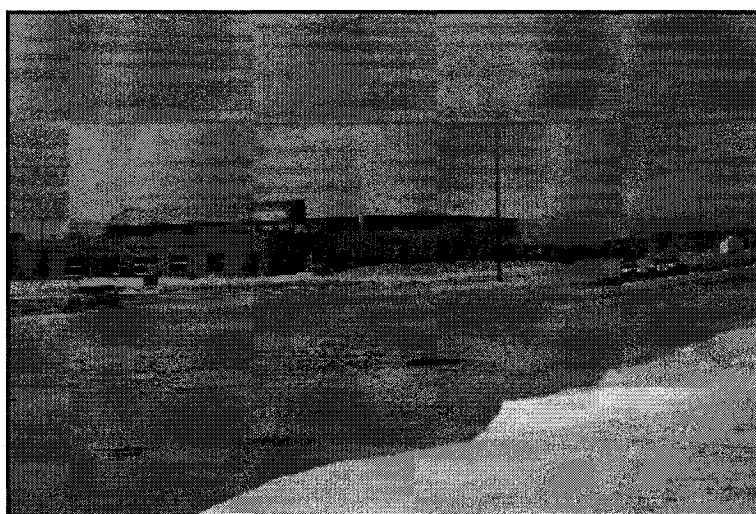


Figure 2.2 : Le boulevard McKnight au matin, après la rupture d'une conduite de 1 200 mm (Spelay et Sharp 2004).

À 9h, 100 000 résidences et un hôpital majeur de la ville n'avaient plus d'eau ou de très faibles pressions. Le Waterworks Emergency Operations Center a été activé. De nombreuses équipes de différents domaines se sont penchées sur le problème afin de fournir une aide décisionnelle efficace, sur le plan des opérations à mener sur le site ou sur le plan de la communication avec les médias et le public. L'isolation de la canalisation du reste du réseau a nécessité plusieurs heures dû au fait que les vannes devant être fermées étaient elles-mêmes sous plusieurs mètres d'eau, eau qui gelait très rapidement (-35°C). À 11h, le service en eau était rétabli. Le maillage du réseau a permis de subvenir aux besoins normaux de la population sans s'appuyer sur cette canalisation. L'urgence initiale était passée mais de nouveaux problèmes ont suivi : il fallait pomper

les 20 millions de litres avant qu'ils ne gèlent et fassent de plus gros dégâts sur la canalisation, le centre d'appel d'urgence recevait de nombreux appels concernant une eau colorée. L'urgence était désormais un éventuel risque de contamination de l'eau suite aux dépressurisations qui ont suivi la rupture. Des dépressurisations de cette importance sont propices à de multiples intrusions dans le réseau. Des prélèvements ont montré néanmoins une concentration résiduelle en chlore suffisante et aucun avis de faire bouillir l'eau n'a été émis. Il a seulement été conseillé de laisser les robinets ouverts quelques minutes de manière à laver les conduites des sédiments qui ont pu y pénétrer. Suite à cet incident, des études ont été menées sur 1,6 km de cette conduite. Les recherches et les réparations ont coûté 700 000 \$ canadiens (Spelay et Sharp 2004).

Ainsi, certaines canalisations peuvent se rompre, causant de nombreux dégâts. Ces dégâts peuvent être de toutes sortes : inondations, effondrements de chaussées, glissements de terrains engendrant des fermetures d'artères principales des villes en sont des conséquences directes. À cela s'ajoutent les problèmes indirects tels que des ondes de pressions transitoires possibles dans certains secteurs pouvant mener également à d'autres ruptures, les arrêts d'approvisionnement en eau potable chez les particuliers et les usines, les hôpitaux, etc. Dans l'exemple présenté ci-dessus, le maillage du réseau a permis de maintenir l'alimentation en eau malgré le bris. Cependant, si une grande quantité de contaminants s'étaient introduits dans le réseau de conduites, ce maillage aurait été préjudiciable car il aurait permis la diffusion de la contamination et rendu difficile sa localisation. D'autres conséquences peuvent être plus catastrophiques : les pompiers peuvent venir à manquer de pression et d'eau dans certains secteurs. Des points sensibles tels que les hôpitaux peuvent subir les répercussions d'un mauvais approvisionnement en eau. Une rupture de canalisation pourrait aussi engendrer la mise hors service d'installations de la protection civile. Les conséquences de l'interruption des communications des services secours seraient vraiment problématiques.

Il est donc important et nécessaire de se préparer à l'éventualité de tels événements. Des approches d'analyse et de gestion de risques peuvent permettre cette préparation. Dans

ce contexte, les approches par conséquences sont très utiles. En envisageant au préalable ces situations accidentelles, elles permettent de cibler les points critiques des installations, de les modifier ou d'augmenter leur degré de surveillance de manière à limiter les risques.

Les mises en place de scénarios d'événements, de plans d'interventions et de plans d'urgences sont très bénéfiques et présentent plusieurs avantages : il n'y a pas d'effet de grande urgence, la communication se fait dans de bonnes conditions, personne n'est alors dépassé par les événements et la rapidité d'exécution des différents services est améliorée. Les plans de secours préétablis peuvent se mettre en place.

2.3 MODÈLES D'ANALYSE DES RISQUES DANS LES RÉSEAUX D'EAU POTABLE

Si des méthodes d'analyse de risques existent dans le domaine de l'eau potable, certains aspects présentent des lacunes. Des méthodes sont développées concernant les risques sanitaires, mais peu le sont vis-à-vis des risques de non approvisionnement. Les paragraphes qui suivent présentent les lacunes en matière d'études sur les aspects stratégiques des conduites d'eau potable. Le contexte et l'état actuel dans lequel se trouvent la plupart des réseaux d'eau potable seront établis ensuite. Puis, les méthodes « classiques » de planification de réhabilitation de conduites seront présentées, ainsi que la principale méthode d'analyse de risque applicable au réseau d'eau potable d'une ville. La dernière section discutera des insuffisances en matière d'analyse de risques sur les réseaux d'eau potable et de l'intérêt d'utiliser une nouvelle approche.

2.3.1 Les Infrastructures Essentielles et l'eau potable

Certaines parties d'un système d'eau potable sont primordiales, essentielles au bon fonctionnement des villes et municipalités. Les risques de défaillances des composantes des usines de traitement de l'eau sont généralement mieux connus que ceux des

composantes du réseau de distribution. Ainsi, les risques associés à la défaillance particulière d'une canalisation sont mal caractérisés. Peu d'études « classiques » prennent en compte l'aspect stratégique que peuvent avoir les canalisations vis-à-vis d'autres infrastructures urbaines. Il serait donc intéressant de tenir compte de ce caractère stratégique dans l'élaboration de futurs plans d'interventions. Par stratégique, il faut entendre le rôle primordial et critique de la canalisation pour alimenter les Infrastructures Essentielles (IE) d'une ville. Ezell (2002) souligne le peu de publications qui traitent de méthodes rigoureuses pour évaluer la vulnérabilité d'un système. Il précise qu'avant de poser les questions classiques d'évaluation du risque (qu'est-ce qui peut devenir défaillant ? Quelles en sont les conséquences ?), il est nécessaire de savoir le but du système, et dans notre cas, ce que dessert la conduite. La réflexion peut être poussée plus loin en considérant ce que dessert la canalisation, mais aussi les infrastructures voisines qui pourraient être affectées à la suite d'une éventuelle rupture.

À l'heure actuelle, aucune démarche d'analyse de risque n'a été adaptée ou mise au point pour étudier cette problématique des canalisations d'eau potable. L'étude ici présentée, propose une première démarche d'analyse de risque permettant d'avancer en ce sens.

2.3.2 Survol de l'état des réseaux de distribution d'eau potable

2.3.2.1 Les conduites accusent un retard de remplacement et d'entretien

Tout d'abord se pose la question de l'âge des conduites. En général, les conduites ont des durées de vies utiles plutôt longues (80 à 100 ans) (Cromwell *et al.* 2001), mais il s'avère que toutes les conduites ne résistent pas de la même manière aux conditions extérieures : type de sol (corrosivité), gel, nappe d'eau, acidité de l'eau à l'intérieur de la conduite, type de mise en place, matériau utilisé, fréquence des entretiens, pressions internes subies, types de chaussées les recouvrant, nombre de véhicule par jours, etc. Ainsi, la vie utile des conduites, durée au bout de laquelle la conduite n'atteint plus le

niveau de performance souhaité, peut être différente entre deux conduites de même type. De plus, de nombreuses villes n'ont pas entretenu suffisamment leurs réseaux et procédé aux remplacements de conduites nécessaires. Cette situation entraîne une diminution de la durée de vie utile de certaines conduites et augmente le nombre de conduites ayant dépassé leur durée de vie utile et devant être remplacées à court terme. Ce déficit de remplacement va s'intensifier dans les années à venir, notamment après l'arrivée en fin de vie utile de nombreuses conduites installées lors des booms immobiliers suivant la 2^{ème} guerre mondiale. Cette période intense d'installation sera suivie d'une période intense de réparations ou remplacements dans un futur proche (Cromwell *et al.* 2001).

2.3.2.2 *Des réseaux de conduites consommateurs de capitaux*

Quelle que soit la méthode de planification de remplacement des conduites utilisée, il est nécessaire de recueillir des données concernant le réseau étudié. Certaines municipalités ont lancé de vastes programmes afin de collecter différents types de données sur les canalisations d'eau potable, données devant permettre par la suite la mise au point de plans de réhabilitation à moyen ou long terme. Les données accumulées peuvent être de tout type : diamètres des conduites, profondeurs d'enfouissement, état structural, niveaux de fuites, nombre de bris par kilomètre, etc. Les méthodes utilisées pour générer ces données sont très variées : vidéo, Remote Field Eddy Current (RFEC, champ électromagnétique), émissions acoustiques, ultrasons, infrarouges et thermographie, techniques destructives d'évaluation de l'état structural, tests de capacités hydrauliques, bilans hydrauliques des pertes en eau (Grigg 2004).

La mise en place d'une base de données sur le réseau nécessite une certaine durée d'acquisition, fonction principalement de l'ampleur du réseau. Les coûts associés à cette collecte d'informations sont souvent élevés. L'enfouissement des canalisations rend d'autant plus difficile et coûteux leur inspection et leur entretien. De plus, les données doivent être valides car s'il est intéressant d'avoir des données sur les réseaux d'eau potable, faut-il encore qu'elles soient utilisables pour établir des plans d'interventions.

Les investissements récents dans les systèmes d'eau potable ont surtout servi à la mise en place de procédés de traitements visant à répondre aux nouvelles normes. Bien des gouvernements comme celui des États-unis, ont concentré la majorité de leurs efforts et de leurs capitaux sur les procédés de traitements pour s'assurer une qualité irréprochable (Safe Drinking Water Act par exemple), mais les réseaux peuvent également avoir une importance capitale sur la qualité de l'eau distribuée (Cromwell *et al.* 2001). Enfin, les observations sur la vétusté des réseaux d'eau potable s'appliquent également aux réseaux de collecte des eaux usées des municipalités, réseaux étant le plus souvent construits en parallèle des réseaux d'eau potable.

Pour réagir à cette situation, il faut mettre en place une planification de réinvestissement efficace. Il faut donc considérer des méthodes rationnelles, générales, systématiques, économiquement et financièrement viables de manière à définir, prioriser et programmer les remplacements ou les réparations des conduites. Comme le montre la Figure 2.3, il faut savoir que l'eau potable et les eaux usées accaparent une partie importante des charges annuelles budgétaires d'une municipalité. Parmi ces capitaux, près de 80% concernent essentiellement les canalisations (Cromwell *et al.* 2001).

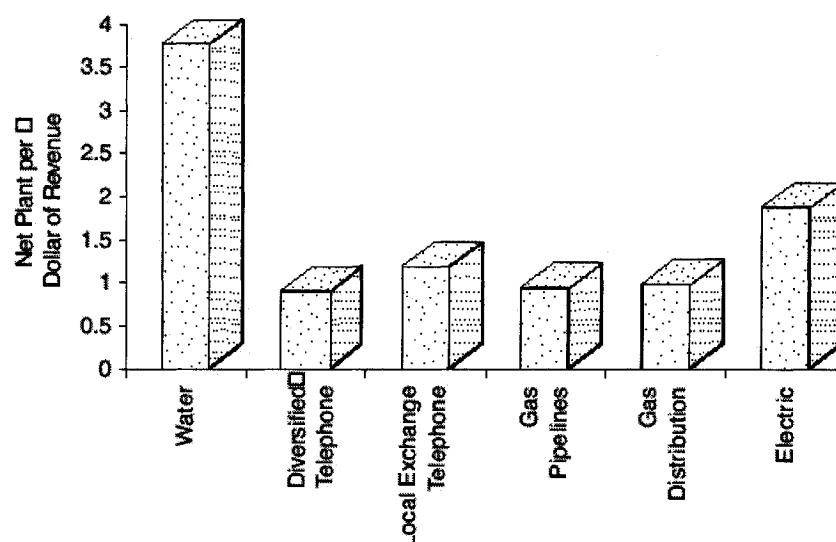


Figure 2.3 : Répartition des capitaux d'une municipalité (Cromwell *et al.* 2001).

Ce point de vue est également repris par l'AWWA : «water is by far the most capital intensive of all utility services, mostly due to the cost of these pipes, water infrastructure that is literally a buried treasure beneath our streets» (American Water Works Association (AWWA) 2001).

Financièrement, l'inaction engendre un double risque : une augmentation de l'investissement pour les remplacements et une augmentation des coûts d'opérations liés aux éventuelles ruptures, sans compter évidemment les risques et les coûts supplémentaires associés à l'interruption de l'alimentation en eau potable d'une structure essentielle d'une municipalité.

2.3.2.3 La situation à Montréal

Certaines grandes villes, ayant quelque peu négligé l'entretien de leur réseau de distribution d'eau potable, prennent conscience de l'ampleur du problème. C'est le cas de Montréal, dont le bilan général sur l'état du réseau d'eau potable est plutôt alarmant :

- sur les 680 km de conduites primaires et les 4560 km de conduites secondaires, 33% ont déjà atteint leur durée de vie utile et ce chiffre atteindra les 67% en 2022 ;
- « mis à part les réseaux primaires, les arrondissements ne disposent pas de diagnostic précis de l'état de leurs infrastructures leur permettant d'établir dès maintenant un plan d'intervention » ;
- le type de gestion le plus utilisé est la gestion à court terme et la gestion réactive sachant que « la majorité des arrondissements n'interviennent que pour répondre aux urgences » ;
- 15 arrondissements sur 27 dépassent la moyenne canadienne de 20 fuites ou bris par 100 km et ce chiffre doit être supérieur étant donné que seulement 12 arrondissements procèdent à des campagnes de dépistages de fuites, etc (Consortium SNC-Lavalin/Dessau-Soprin 2002).

Ce même rapport évalue l'effort financier à réaliser sur les conduites secondaires à 1 950 M\$ sur 20 ans. Étant donné l'ampleur du capital investi pour la réhabilitation des conduites, il est important de mettre en place des plans de renouvellement judicieux.

2.3.3 Les méthodes communes de planifications de remplacements de conduites

Comment peut-on planifier la réhabilitation et le remplacement des conduites constituant un réseau d'eau potable ? Les enjeux techniques et financiers sont très importants. La réponse à cette question nécessite la connaissance de certaines données qui sont le plus souvent cruellement manquantes. Plusieurs méthodes sont disponibles pour planifier le remplacement des conduites de distribution.

2.3.3.1 Des approches reflétant les contextes réglementaire et commercial locaux

En Ontario, une lettre du ministre de la Réhabilitation des Infrastructures Publiques prouve la prise de conscience du problème : « des programmes d'entretien insuffisants et des sous investissements ont laissé la province avec le plus sérieux déficit en infrastructure de son histoire » (Ministry of Public Infrastructure Renewal 2004). Face à ce constat, un plan d'infrastructures et de financement du secteur public a été mis en place. Ce plan s'adresse au gouvernement provincial, aux municipalités ainsi qu'aux partenaires du secteur public et devrait leur permettre de choisir les meilleures options de planification, de financement et d'acquisition des infrastructures.

Concernant l'eau potable, une loi a déjà été mise en place en Ontario : il s'agit de la Sustainable Water and Sewage Act. Cette loi régit le financement des infrastructures de traitement et de distribution des eaux potables et usées. Elle oblige l'évaluation des coûts de maintien, de remplacement et d'exploitation des infrastructures et une tarification permettant d'assurer le financement de ces infrastructures (exploitation et renouvellement). Un groupe d'expert Stratégie Hydraulique a été convoqué en août 2004 ayant pour mission de fournir des conseils sur l'organisation et le financement à long

terme des réseaux d'aqueducs et d'eaux usées de l'Ontario. Les experts ont donc émis diverses recommandations (Groupe d'experts - Stratégie hydraulique et Ministère du Renouvellement de l'infrastructure publique de l'Ontario 2005). Les données contenues dans ce rapport concernent surtout l'aspect financier et non technique des travaux à entreprendre sur le réseau d'eau potable :

- Accroître l'échelle et la capacité des réseaux d'aqueduc : des réseaux desservant plus de 100 000 personnes sont plus économiques et permettent d'assurer un meilleur contrôle de la qualité ;
- Renforcer la gouvernance des services d'alimentation en eau et accroître leur efficacité en faisant en sorte que ces services soient fournis par les installations municipales ;
- Veiller à ce que les municipalités se tournent vers leurs clients pour assurer leur viabilité financière (recouvrement intégral des coûts) ;
- Créer un organisme de réglementation indépendant (la Commission des eaux de l'Ontario) chargé de revoir les plans d'affaires et les tarifs proposés pour l'eau ;
- Encourager les innovations technologiques et la formation pour réduire les coûts ;
- Revitaliser l'Agence ontarienne des eaux en modifiant son mandat de façon à assurer son autonomie vis-à-vis de la province et à établir un conseil d'administration axé sur les affaires.

Au Québec, le Vérificateur Général du Québec a également émis différentes recommandations. Il est nécessaire d'améliorer la connaissance globale de l'état des infrastructures liées à l'eau potable, de continuer à partager les expériences des différents gérants de réseaux ainsi que les bonnes pratiques de gestion, de déterminer des indicateurs permettant d'évaluer les différentes gestions dans la perspective de développement durable, etc (Vérificateur Général du Québec 2005). Sur le plan technique, le Centre d'Expertise et de Recherche en Infrastructures Urbaines (CERIU) s'est fixé 4 objectifs : (i) favoriser une mobilisation québécoise et nationale axée sur la

problématique des infrastructures urbaines, (ii) initier et coordonner de nombreux projets mobilisateurs d'expérimentation de nouvelles technologies dans des travaux d'infrastructures de villes québécoises et canadiennes, (iii) stimuler la recherche dans les secteurs stratégiques pour améliorer la qualité et la gestion des infrastructures, (iv) encourager les partenariats entre industriels et chercheurs (Centre d'Expertise et de Recherche en Infrastructures Urbaines (CERIU) 2006). Le CERIU a été à l'initiative de l'organisation InfraGuide, créée en 2001 pour remédier au déficit croissant en matière d'infrastructures au Canada (InfraGuide 2006). Cette organisation publie des guides qui recensent les « règles de l'art » de différents domaines, dont celui de l'eau potable.

La publication intitulée « Élaboration d'un plan de renouvellement de réseau de distribution d'eau » résume les grandes tendances, en matière de planifications de réhabilitation des réseaux d'eau potable. Deux types de démarches doivent être mises en place dans les municipalités. Tout d'abord, une démarche descendante, qui permette d'évaluer, sur le long terme, les coûts de renouvellements et de remplacements en fonction de la vie utile des conduites (Guide National pour des Infrastructures Municipales Durables (InfraGuide) 2003). Cette démarche est comparable aux modèles Kanew et Nessie présentés plus bas dans cette même section. La deuxième démarche, ascendante, consiste en une stratégie de planification à court terme et repose sur la réalisation d'un inventaire détaillé des éléments d'actifs (dont les conduites), de leur état actuel, de la vitesse à laquelle ils se détériorent, etc. L'approche ascendante repose sur de nombreuses données réseaux, comme le montre le Tableau 2.1 tiré du même guide. Selon ce même rapport, toutes les municipalités devraient compiler les données dites de « base » et utiliser, si possible, un système d'information géographique. Par la suite, l'étude de ces données devrait permettre de planifier correctement les remplacements de conduites. Cependant, il est clair que pour certaines municipalités, ces données de « base » ne sont pas du tout disponibles et leurs compilations risquent d'être coûteuses en temps et en argent.

Tableau 2.1 : Indicateurs de l'état ou du comportement d'un réseau de distribution d'eau
(Guide National pour des Infrastructures Municipales Durables (InfraGuide) 2003).

Facteur	De base	Avancés
Physique	Longueur, Diamètre et Matériau conduite Année de pose	Épaisseur paroi, Revêtement, Fabricant, Protection cathodique, Protection polyéthylène, Matériaux branchements, Diamètres branchements, Densité branchements, Profondeur nappe phréatique, Classification de la route
Structural	Taux de rupture	Tendances en matière de rupture, Profondeur du puits, Type de sol, Résistivité du sol
Hydraulique	Débit de lutte incendie, Pression d'eau incendie	Facteur C, Chute de pression à l'ouverture d'une borne incendie, Vitesse d'écoulement/perte de charge en cas de forte demande
Qualité de l'eau	Nombre de plaintes, Revêtement intérieur conduites, Chlore résiduel, Turbidité	Concentration en fer, Concentration en plomb
Fuites	Nombre de fuites, Volume des fuites	Types de joints, Coefficients de l'IWA relatif aux fuites dans les infrastructures
Conformités aux normes de conception courantes	Matériau conduite, Séparation des égouts	Profondeur de la conduite
Importance /possibilité de danger /conséquences d'une défaillance	Diamètre conduite, Matériau conduite	Conséquences d'une interruption de service, Sécurité du public, Perturbation de la circulation, Possibilités de dommages aux biens, Coûts de réparations

2.3.3.2 Des modèles de planification de réhabilitation de conduites

La durée de vie utile, clé de la planification

La notion de durée de vie utile est présente dans toutes les méthodes de planification de réhabilitation de conduites d'eau potable. Elle représente la période pendant laquelle la conduite d'eau potable remplit les fonctions pour lesquelles elle a été construite et mise en place à un niveau de performance acceptable. Cette durée de vie utile atteinte, la conduite devrait théoriquement être remplacée. Cette notion peut s'illustrer à l'aide de courbes de détérioration. Comme le montre la Figure 2.4, passé un certain âge, une infrastructure n'est plus en mesure de fournir un niveau de service visé. Si aucun entretien n'est réalisé au cours de son utilisation, sa vie utile sera d'autant plus courte. Par contre, un entretien régulier permet de prolonger sa durée d'utilisation en maintenant un niveau de service acceptable. Néanmoins, il arrive un âge où seules une rénovation ou un remplacement permettent d'assurer la pérennité de la performance du service assuré par l'infrastructure.

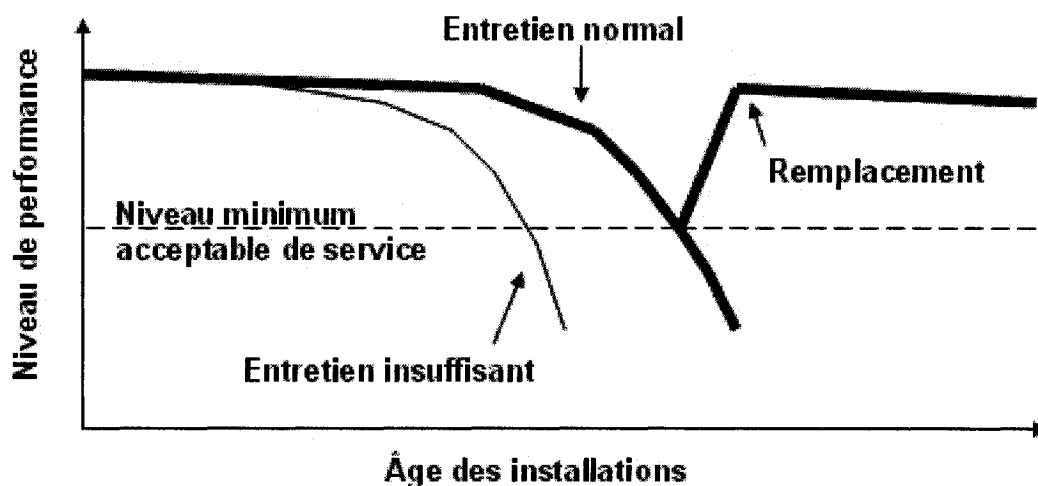


Figure 2.4 : Courbe de détérioration d'une infrastructure (traduite de Lemer 2000).

Selon les municipalités, les durées de vies utiles peuvent faire l'objet de points de vues différents. Les grandes municipalités des États-unis utilisent en général des programmes

de gestion de renouvellement de conduites souvent basés sur les résultats des recherches de l'AWWARF et les bonnes pratiques de l'AWWA. Le principe est le suivant : la performance des conduites dépend des conditions de sols, de leur mise en place, de la topographie locale, etc. Le modèle considère que ces facteurs sont les mêmes sur des zones définies. Pour chaque zone, le niveau de performance peut ainsi être évalué et ainsi la durée de vie utile. Le but de cette démarche est d'évaluer l'état des conduites et de les remplacer lorsqu'il n'est plus rentable de les réparer, en fin de vie utile. Les facteurs considérés incluent l'historique des fuites, les dangers liés aux séismes, l'impact sur les consommateurs, l'équipement mis en œuvre, et l'analyse des coûts. Des Systèmes d'Informations Géographiques (GIS) sont utilisés.

Certaines municipalités Australiennes, elles, ont une approche différente. Selon elles, il serait plus économique de réparer les conduites même une fois leur durée de vie utile passée (Cromwell *et al.* 2001). Elles ont opté pour une stratégie qui était d'endurer les bris de conduites, tout en travaillant parallèlement sur une stratégie de minimisation des coûts de réparations. Les dirigeants ont choisi d'accepter le risque de bris en mettant parallèlement en place des stratégies d'interventions post-bris efficaces. Selon certaines de ces municipalités, la durée de vie utile des conduites devrait être de 125 à 150 ans, plutôt que 50 à 100 ans. Le fait d'augmenter la durée de vie des conduites leur permet « d'étaler » dans le temps les pics d'investissement de réhabilitations.

Des approches basiques

Des méthodes simples de planification de réhabilitation de conduites d'eau potable existent. La majorité des municipalités nord-américaines remplacent les canalisations à un taux qu'elles pensent approprié en fonction du taux de bris dans les secteurs de leurs réseaux. Tant que le nombre de ces bris reste dans les limites de l'acceptable, ce taux de remplacement est jugé comme satisfaisant. Cependant, cette approche ne permet pas de prédire et de se préparer à une hausse éventuelle du taux de bris. Généralement, 0,1 à 1% des conduites sont remplacées chaque année et les municipalités semblent se contenter

de cette politique (Cromwell *et al.* 2001), qui reste une solution à court terme. L'âge moyen des conduites étant de 85 ans, il faudrait donc élever ce taux de remplacement à environ 1,2% ou s'assurer que les conduites puissent avoir une durée de vie utile de 100 ans. Également, certaines municipalités n'ont pas vraiment de planification proprement dite. Elles sont contraintes de réagir et se contentent de remplacer les conduites lorsqu'un problème survient. Ces approches basiques ne sont pas de véritables solutions et les villes doivent s'orienter vers des méthodes plus précises et judicieuses si elles veulent atténuer les pics d'investissements à réaliser dans les décennies futures, pics liés à l'après Seconde Guerre Mondiale.

Le modèle Kanew

Le modèle Kanew est un logiciel développé en Allemagne et aux USA qui relie des données techniques et économiques. Il se base sur différents critères dont les plus importants sont l'âge, les matériaux, le diamètre et le type de pose des conduites (Deb 2002). Des fonctions basées sur les défaillances passées et sur l'opinion d'experts sont déterminées pour prédire la durée de vie utile des conduites. Des scénarios pessimistes et optimistes sont établis. Techniquement, Kanew évalue le type de conduites de même matériau, leurs diamètres et estime le pourcentage et le nombre de km de chaque type de conduite à réhabiliter par an, sur les 20 prochaines années. Sur le plan économique, il estime les coûts engendrés en se basant sur les données passées des services municipaux concernant les canalisations enfouies. S'il ne permet pas de localiser les zones à réhabiliter, les informations concernant les quantités de conduites à rénover peuvent permettre d'évaluer le budget à allouer à ce domaine (Deb 2002). Le modèle Kanew permet donc de quantifier les coûts mais pas de localiser les réparations, réhabilitations ou programmes de remplacement en fonction des risques encourus par des Infrastructures Essentielles en cas de défaillance du réseau d'eau potable.

Les courbes Nessie

Les périodes d'après guerre (Guerres Mondiales I et II en particulier) ont vu se développer des périodes intenses de construction d'infrastructure et notamment celles liées à l'eau. Ces infrastructures étant déjà ou sur le point d'arriver à leur fin de vie utile, il est prévisible de voir apparaître des échos de ces pics d'installations en réparation ou remplacement. Les courbes Nessie servent à quantifier les augmentations en investissements nécessaires. Elles constituent un ensemble de prédictions de besoins en capitaux de remplacement projeté dans le temps (Cromwell *et al.* 2001). Elles précisent les périodes où ces échos vont se produire. La Figure 2.5 montre une représentation de ces courbes Nessie dans différents domaines d'investissement en eau.

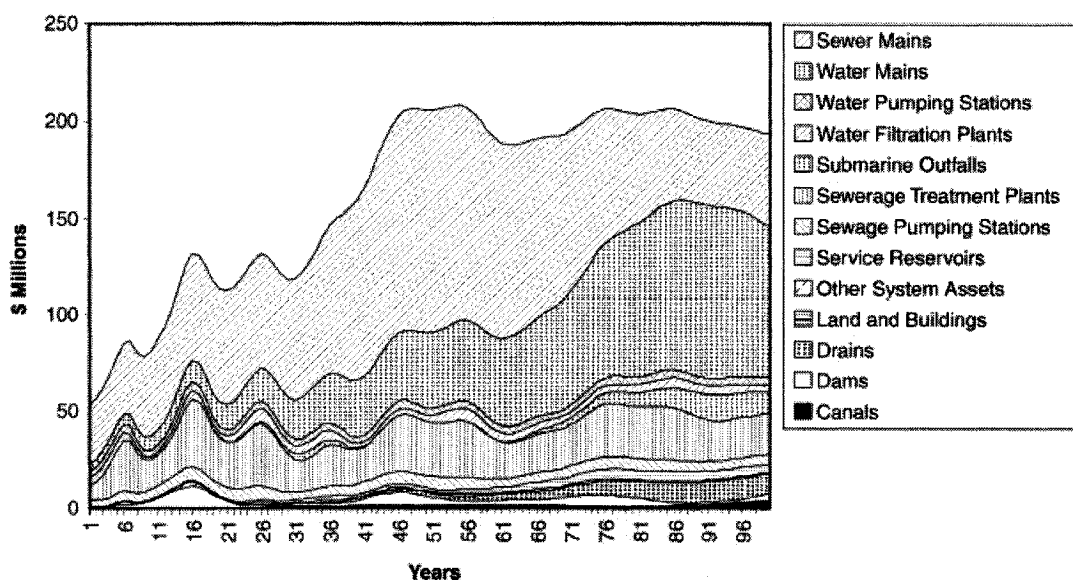


Figure 2.5 : Les courbes Nessie (Cromwell *et al.* 2001).

Concrètement, pour chaque parcelle de terrain possédant globalement les mêmes caractéristiques environnementales et pour laquelle l'âge des conduites du réseau est relativement proche, il est possible d'établir une courbe Nessie. Des courbes de détérioration peuvent être construites simplement à partir des données de ruptures s'étant produites à l'aide d'une régression. Une fois que la première rupture est apparue dans une parcelle donnée, les ruptures suivantes peuvent être prédites avec une précision de plus en plus grande. Chaque nouvelle rupture enrichit la base de données et augmente les

capacités de prédiction. L'ensemble des analyses regroupées permettra l'obtention de prévisions globales pour les municipalités. La méthode des courbes Nessie n'est possible qu'avec une bonne base de données sur le réseau. L'utilisation de telles courbes permet à la fois de guider la répartition des réparations ou remplacements dans le temps, mais aussi d'établir un plan de financement. Cependant, les risques encourus par des Infrastructures Essentielles à la suite de défaillances du réseau d'eau potable ne sont pas pris en compte.

Il n'y a pas de méthode universelle pour planifier les remplacements des conduites d'un réseau d'eau potable. Les prises de décisions sont d'abord fonction des obligations réglementaires ou contractuelles, des données disponibles et des situations d'urgences. À l'heure actuelle, les études menées n'ont pas fourni suffisamment de résultats pour savoir si les méthodes mentionnées ici sont effectivement efficaces. Si, d'une manière générale, la plupart de ces méthodes ont un aspect financier important, peu prennent en compte véritablement le risque et les conséquences d'une défaillance du réseau d'eau potable. La prochaine partie présente une des rares analyse de risques applicable sur le système global de traitement et distribution d'eau potable.

2.3.4 HACCP et la qualité

La méthode HACCP (Hazard Analysis of Critical Control Points) s'applique à tout le secteur alimentaire et est reconnue par l'OMS comme étant la première méthode d'analyse de risque dans le milieu de la sécurité alimentaire. Cette approche est mise en œuvre à des degrés variables dans les réseaux d'eau potable européens et son application actuelle vise surtout à prévenir des impacts sanitaires. Cette analyse se concentre sur la qualité de l'eau desservie depuis la source au robinet (United States Environmental Protection Agency (USEPA) 2005). Voici un bref résumé de cette méthode. Après avoir recueilli suffisamment de données pour permettre l'élaboration d'un diagramme complet de fonctionnement du système d'eau potable, il faut appliquer le premier principe de la méthode qui est de lister les dangers potentiels, les analyser et trouver des mesures de

contrôle. Le second principe vise, lui, à déterminer les points de contrôle critiques (CCP) de notre système, points où un contrôle permet d'éliminer ou de réduire l'apparition d'un danger à un niveau acceptable. Le troisième principe indique qu'il faut fixer, pour chaque CCP, les limites critiques : la limite de qualité acceptable et la limite de qualité souhaitée. Le quatrième principe a pour but d'établir des moyens de contrôle ou de surveillance des CCP afin de s'assurer du respect des consignes et de la validité des valeurs des points de contrôles existants. Enfin, le dernier principe consiste à prévoir des actions correctives d'éventuels problèmes (par exemple, prévoir les actions à entreprendre si un des CCP indiquait un dépassement de limite). Un bouclage de la méthode permet de vérifier que l'approche est bien complète. De même, un archivage des données dans le temps permet de valider ou modifier le plan HACCP (United States Environmental Protection Agency (USEPA) 2005).

Cette approche systématique aide les municipalités à identifier l'origine des dangers potentiels, minimisant ainsi les apparitions et les effets d'incidents pouvant dégrader la qualité de l'eau et avoir un impact sanitaire. La méthode HACCP peut fournir de nombreux bénéfices aux municipalités dont l'amélioration : (a) de la protection de la santé publique, (b) de la capacité de démonstration d'une diligence raisonnable, (c) des conceptions et opérations des procédés liés au traitement de l'eau, (d) de la compréhension des risques et de leur gestion, (e) des compétences des employés au niveau des opérations à mener sur les systèmes, (f) des processus de travaux comme les stratégies de contrôle, les procédures de documentation et méthodes de communication. De plus, la mise en place d'un plan de sécurité de la qualité de l'eau apporte les bénéfices suivants: (a) aide à l'établissement de priorités, (b) justification de décisions à tous niveaux, (c) amélioration de la compréhension des systèmes et réduction des doutes lors de prises de décisions, (d) amélioration et simplification de la façon de penser, (e) amélioration de l'image et de la réputation des gestionnaires municipaux, (f) amélioration de l'efficacité des petits systèmes dans l'utilisation des ressources (United States Environmental Protection Agency (USEPA) 2005).

Il n'y a pas encore eu beaucoup de publications concernant l'utilisation de cette méthode dans le domaine de l'eau potable étant donné que son utilisation est plutôt récente. Le point faible de cette méthode, vis-à-vis de son application au système de traitement et distribution d'eau potable est que de nombreuses données sont nécessaires et, dans le cas où ces données ne sont pas disponibles, l'évaluation est vite compromise. De plus, dans son application actuelle en Europe, seul l'aspect du risque sanitaire est abordé. La présence d'Infrastructures Essentielles sur des secteurs n'est pas prise en compte.

2.3.5 La nécessité d'une nouvelle approche

À la lecture des sections précédentes, il est possible d'identifier certaines limitations des modèles d'évaluation et de planification du renouvellement des conduites d'un réseau d'eau potable. Il y a un manque évident d'études sur les aspects stratégiques des conduites. Parmi les méthodes de planification de renouvellement ou de réhabilitation de conduites, peu prennent en compte les risques engendrés par le dysfonctionnement du réseau de distribution d'eau potable sur les Infrastructures Essentielles qu'il dessert. Le risque principal étudié dans la majorité des cas est le risque de défaillance associé à des types de conduites en particulier dû à leurs caractéristiques propres (âge, niveau de corrosion, type de matériau, etc.) ou environnantes (type de sol, etc.). De plus, les modèles demandent un certain nombre de données sur le réseau d'eau potable qui ne sont pas forcément disponibles auprès des municipalités. Enfin, l'obtention de ces données est coûteuse en temps et en investissement.

La plupart des méthodes d'analyse et de gestion des risques ont une approche classique de la problématique. Globalement, la démarche est la suivante :

- une fois le système étudié défini, une liste des dangers probables pouvant l'affecter est dressée. Dans notre cas, ce système est le réseau de distribution de l'eau potable sur une zone définie. Les dangers pouvant affecter les canalisations sont la corrosion, le gel-dégel, une erreur des agents des travaux publics, etc.

- les conséquences pouvant être engendrées par la réalisation de ces événements non souhaités sont alors analysées et les dangers menant à des conséquences inacceptables font l'objet d'études plus poussées. Vis-à-vis du réseau d'eau potable, les conséquences engendrées par les différents dangers sont multiples : fuites, ruptures, contamination, usure prématurée des matériaux, etc.
- des points de contrôles et des limites d'acceptabilités sont établis ainsi que des mesures d'interventions en cas de dépassement de ces limites. Les mesures pour parer aux conséquences des événements précédents pourraient être les suivantes : mettre suffisamment de chlore pour assurer le non développement de bactéries ou algues, mise en place de sondes anti-corrosion, de vannes, etc.
- Avec le temps, la base de données s'enrichit de manière à vérifier si les contrôles sont les bons et s'ils sont suffisants.

Cette approche classique convient assez bien pour évaluer les risques d'intrusion au sein du réseau lui-même (HACCP). Par contre, pour ce qui est de définir des zones et des conduites prioritaires vis-à-vis des interventions de réhabilitations à effectuer en vue de minimiser les risques de dégâts sur d'autres infrastructures, ces méthodes nécessiteraient des modifications. Comme le souligne Robert (2004), les analyses de risque classiques ne prennent pas en compte les effets dominos entre de multiples entités différentes. Par ailleurs, les démarches classiques reposent sur le phénomène de causalité, ce qui, dans notre cas, peut constituer un obstacle étant donné les nombreuses données que nécessite ce type de démarche.

Le modèle causal repose sur ce principe : SI tel événement a lieu, ALORS que se passe-t-il ? Pour un système fermé, c'est-à-dire bien défini, comme une usine, pour lequel de nombreuses données sont disponibles, ce modèle est bien adapté. En fait, le modèle causal est utilisé lors de la conception des installations et de l'élaboration des plans d'opération. Cet exercice d'évaluation est nécessaire pour la planification des équipements de pompage et le maillage des réseaux. Toutefois, pour un système comme le réseau de distribution d'eau potable, qui n'est pas forcément bien défini, et pour

lequel les interactions possibles entre différentes zones ou canalisations restent plutôt floues, une analyse de risque reprenant le modèle causal est plus difficilement applicable. Ou alors, pour mener correctement cette étude avec cette approche, il faudrait récolter et actualiser des quantités de données ce qui représenterait un coût très élevé pour la société. Cette étude va tenter de proposer une démarche inverse pour atteindre les objectifs de protection des IE sans recourir à des informations trop précises concernant le réseau lui-même.

La première méthode venant à l'esprit est de faire un bilan de l'état de chaque canalisation, puis un bilan hydraulique et ensuite de jumeler ces données avec une étude d'analyse de risques basée sur les conséquences que peut engendrer sur les IE une rupture ou une fuite dans chacune de ces canalisations. Cela devrait permettre d'établir une hiérarchisation des canalisations sur lesquelles intervenir en fonction de différents facteurs déterminés préalablement (niveau de vétusté, ampleurs des conséquences d'une rupture, etc.). Cependant, la rareté et le coût de ces données limitent cette approche. Une autre approche, qui apparaît plus réalisable, consiste à inverser les démarches classiques, à abandonner la méthode de type causal pour une méthode fondée principalement sur les conséquences engendrées suite aux défaillances des conduites.

Le raisonnement est le suivant : vu le manque de données disponibles concernant le réseau de distribution d'eau potable, le problème peut être traité avec une approche par conséquences. Dans ce cas, le système étudié devient la ville elle-même avec l'ensemble de ses infrastructures et le réseau d'eau potable est alors perçu comme un danger potentiel pour la ville. Les données nécessaires à l'étude sont propres aux infrastructures de la ville et non plus exclusivement au réseau d'eau. La méthode ne demandera certainement pas moins de données, mais contrairement aux approches classiques, une partie des données concernera la ville et ses Infrastructures Essentielles et relativement peu de données sur le réseau de conduites seront nécessaires. Les Infrastructures Essentielles (IE) deviennent les points importants à surveiller et le but de l'étude

consiste à évaluer leur vulnérabilité par rapport au réseau d'eau, notamment suite à des fuites, des pertes de pressions ou encore des ruptures de canalisations. Les données les concernant peuvent être connues (vulnérabilité des souterrains face aux inondations, pressions minimales dans le réseau pour les incendies, capacité d'un hôpital à faire face à une coupure en eau, etc.), de même que les caractéristiques des zones dans lesquelles elles se situent (présence de canalisations d'eau potable de grands diamètres, topographie, densité du réseau de captage des eaux de ruissellement, etc.). Il est alors possible, en fonction de ces différents critères, d'établir un classement, vis-à-vis du danger potentiel que représente le réseau d'eau potable, entre les différentes zones étudiées. Un maillage plus serré permettrait même de mieux cibler les zones sensibles, où une défaillance du réseau (manque de pression, rupture, ou fuite conséquente) pourrait avoir de sérieuses conséquences. Néanmoins, étant donné la complexité d'un réseau d'eau potable, il est nécessaire de simplifier l'approche. Vouloir obtenir une trop grande précision est illusoire.

La mise en place d'une telle approche permettrait une optimisation de la planification de la réhabilitation du réseau de manière à éviter les plus gros risques aux IE. L'avantage principal de cette approche est qu'elle nécessiterait relativement peu de données concernant le réseau lui-même (plan du réseau, diamètres des canalisations, débits, pression, etc.). Cependant, si certains secteurs possèdent plus de données sur leur réseau, il serait tout à fait envisageable de pouvoir en tenir compte également.

Cette démarche d'analyse de risque pourrait déboucher sur une méthode technique de planification de travaux « critiques » à effectuer sur les conduites pour protéger les IE, planification fondée principalement sur le facteur risque. Il serait ensuite intéressant d'intégrer aux modèles de planification déjà existants (Kanew par exemple) ces éléments d'information pour soutenir la hiérarchisation des travaux de rénovation des réseaux de distribution d'eau potable.

CHAPITRE 3 OBJECTIFS DE RECHERCHE

L'objectif principal de cette étude est de proposer une démarche d'analyse de risque sur les Infrastructures Essentielles d'une ville par rapport aux défaillances de son réseau de distribution d'eau potable. Cette démarche repose sur une approche par conséquences remontant depuis les IE jusqu'au réseau d'eau potable. Le but est de minimiser les risques de dysfonctionnements des IE dus à des défaillances du réseau de distribution d'eau en proposant une hiérarchisation de zones ou de conduites à réhabiliter en priorité.

Plusieurs sous objectifs découlent de cet objectif principal :

- 1) établir un cadre précis d'étude, *i.e.* cibler les Infrastructures Essentielles au sein d'une municipalité ;
- 2) caractériser les liens entre les IE et le réseau d'eau potable d'une ville, *i.e.* évaluer la vulnérabilité des IE face à la non réalisation d'une mission du réseau d'eau potable ;
- 3) identifier et caractériser les sources des problèmes pouvant survenir sur le réseau d'eau potable, *i.e.* retracer les sources de dangers pouvant affecter le réseau d'eau potable et causer l'apparition de ces conséquences sur les IE ;
- 4) hiérarchiser des zones ou conduites critiques sur lesquelles l'apparition d'un problème pourrait engendrer le dysfonctionnement d'une IE, *i.e.* classer des zones du réseau d'eau potable en fonction des potentiels plus ou moins avérés de dangers caractérisés précédemment.

Cette démarche permettra aux municipalités d'intégrer à leur plan de réhabilitation le risque encouru par leurs IE suite à une défaillance du réseau. L'analyse combinant les informations sur les IE et des données plus sommaires concernant les réseaux de conduites de distribution d'eau potable permettra d'identifier certaines actions de réhabilitation prioritaires sans les délais et les coûts associés à une analyse plus poussée du réseau d'eau.

CHAPITRE 4 DÉMARCHE D'ANALYSE DE RISQUE PROPOSÉE : UNE APPROCHE PAR CONSÉQUENCES

4.1 PRÉSENTATION DE LA DÉMARCHE

4.1.1 Notion de vulnérabilité

Il est difficile de définir la vulnérabilité. Cette notion en appelle deux autres : l'aléa et l'enjeu (Portail pour la prévention des risques majeurs 2006). Relativement au risque naturel, l'aléa est un évènement potentiellement dangereux, un phénomène naturel, physique, représenté, le plus souvent, par sa période de retour et ses descripteurs physiques (amplitude, intensité, etc.). Les enjeux sont les intérêts (humains, économiques, environnementaux, etc.) menacés par l'aléa. La vulnérabilité mesurerait les conséquences d'un risque majeur, qui est en fait la confrontation d'un aléa avec des enjeux (Portail pour la prévention des risques majeurs 2006).

Une autre définition, plus mathématique, fait apparaître la notion d'état. La vulnérabilité s'exprimerait par la formule :

$$V = \frac{P \times C}{E}$$

où V est la vulnérabilité, P est la probabilité d'accident, C représente le niveau de conséquences de l'accident, et E l'état de préparation face à cet accident (Doré 2004). Le produit P x C représente le risque et E est l'état de préparation face à ce risque. La vulnérabilité pourrait donc être exprimée mathématiquement comme étant le rapport d'un facteur risque sur un facteur état de préparation face à ce risque.

Blancher (1998) indique qu'il y aurait différentes vulnérabilités selon le type d'aléas. Vis-à-vis d'une entité étudiée, un aléa externe à l'entité serait lié à une vulnérabilité amont, l'entité elle-même aurait sa propre vulnérabilité interne liée à des

dysfonctionnements, et enfin ces dysfonctionnements seraient liés avec une vulnérabilité aval sur l'environnement extérieur à l'entité.

Reason (2000) illustre par le schéma repris à la Figure 4.1 sa définition. En fonction de l'état d'un système, une combinaison d'aléas externes et internes peut aboutir à l'apparition de conséquences.

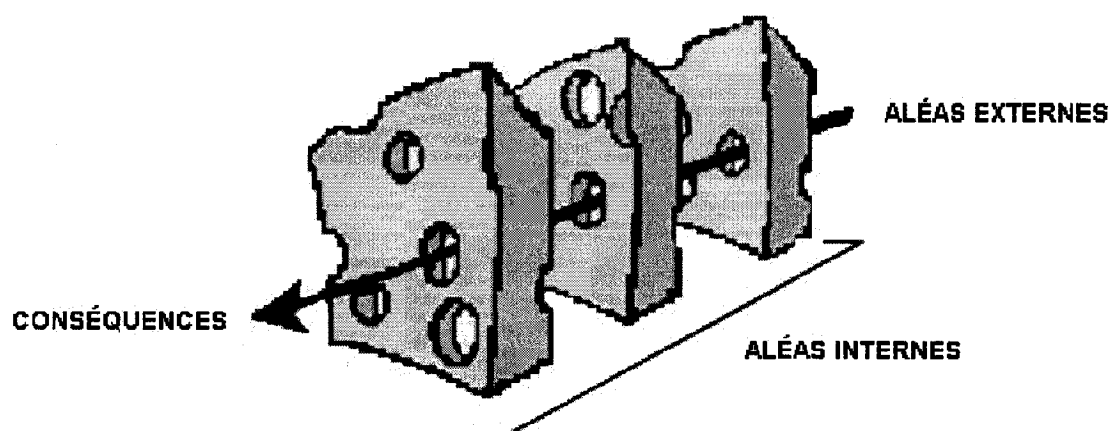


Figure 4.1 : Illustration de la notion de vulnérabilité (figure adaptée de Reason (2000)).

Ainsi, différentes définitions peuvent être attribuées à la notion de vulnérabilité. Celle qui sera retenue dans le cadre de cette étude restera d'ordre général, soit la représentation de l'état d'un système, évolutif dans le temps, et de sa sensibilité face à des éléments anthropiques (internes et externes) pouvant engendrer des défaillances (Robert *et al.* 2005).

4.1.2 Intérêts et utilité de l'approche par conséquences

La démarche proposée va se concentrer sur l'évaluation des conséquences pouvant être engendrées par un dysfonctionnement du réseau d'eau potable sur les IE. Cet aspect constitue l'originalité de l'approche. Si la démarche a évidemment besoin de quelques données réseau, elle ne se base pas exclusivement sur celles-ci et l'accent est mis sur les

conséquences liées à une dysfonction du réseau. Par conséquent, le manque de données sur le réseau ne constitue plus un obstacle insurmontable.

Cette approche devrait permettre d'évaluer les niveaux de dépendance des IE vis-à-vis du réseau d'eau potable et les effets qui pourraient être ressentis suite à un mauvais fonctionnement de celui-ci. Des choix pourront alors être faits de manière à améliorer l'état du réseau dans les secteurs les plus critiques afin de minimiser l'importance des conséquences que pourraient avoir l'apparition des problèmes considérés. Des ajouts de dispositifs augmentant l'autonomie de ces installations pourraient être envisagés. Les choix visant à améliorer l'état du réseau peuvent prendre différentes formes : étude plus poussée du secteur, hiérarchisation des réhabilitations, surveillance accrue du réseau dans ces secteurs, etc. Ces choix sont des mesures préventives face à l'apparition d'un éventuel problème sur le réseau, ou des mesures correctives si le réseau est remis à neuf.

Cependant, si la démarche va reposer principalement sur les conséquences que peuvent engendrer des problèmes du réseau d'eau potable sur les IE, il faut également qu'elle tienne compte des données sur l'état du réseau lorsqu'elles sont disponibles, pertinentes et actualisées. La démarche doit donc présenter une certaine flexibilité à ce sujet.

4.1.3 Schéma de présentation de la démarche globale

La Figure 4.2 (page 37) montre la démarche globale retenue pour l'étude. Ce schéma constitue un plan directeur à travers les différentes étapes de la méthode. La première étape revient à choisir une problématique à étudier. Cette problématique comporte deux volets : choisir une Infrastructure Essentielle (IE) de la ville à étudier (sur le schéma, ces IE sont notées IE A, IE B, etc.) et choisir une mission réseau d'eau potable. C'est vis-à-vis de cette mission réseau que l'étude de l'IE va être réalisée. Les caractérisations respectives de ces deux éléments vont aboutir à l'obtention de critères. Ces critères vont permettre de rassembler différentes informations concernant l'IE choisie sur une carte géographique, carte nommée Ville Infrastructures Essentielles (VIE sur le schéma). Ces

informations sont issues principalement de deux caractérisations de l'IE : (i) une hiérarchisation des éléments constituant l'IE, hiérarchisation du point de vue de l'importance des éléments pour l'IE et (ii) une étude visant à évaluer les niveaux de vulnérabilités des éléments de l'IE face à la mission réseau choisie. Des critères devront également être recueillis concernant le réseau d'eau potable de la ville afin de différencier certains secteurs suivant la mission réseau retenue. Enfin, la juxtaposition des données devrait permettre une analyse qui aboutira à une hiérarchisation de zones ou de conduites à risques du réseau d'eau potable pour l'IE étudiée. Si l'analyse ne permettait pas cela, alors un bouclage serait à envisager en réajustant la problématique globale ou en modifiant les critères obtenus précédemment.

Les sections suivantes expliquent en détail les étapes et éléments qui ont conduit à l'obtention d'une telle schématisation.

4.2 CHOIX D'UNE PROBLÉMATIQUE

4.2.1 Nécessité d'étudier chaque Infrastructure Essentielle de façon séparée

Dans une même ville, les IE sont plus ou moins interdépendantes, ce qui rend leur étude globale complexe. Certaines situations de catastrophes peuvent être envisagées mettant en défaut certains types d'IE mais ces scénarios peuvent très rapidement se transformer en casse-tête en raison des multiples liens entre les infrastructures. Ici, le but cherché est de caractériser les liens que peuvent avoir ces IE avec l'IE que constitue le système d'eau potable et plus spécifiquement le réseau de conduites.

Comment identifier et caractériser les relations entre les IE et un réseau d'eau potable ? La réponse à cette question n'est pas évidente. Les IE sont tellement différentes les unes des autres (protection incendie, santé, communications, énergies, transports, etc.) qu'il paraît vain, voire impossible de vouloir lister et évaluer les différentes relations les liant au réseau d'eau potable, surtout s'il s'agit de ne pas se cantonner à l'étude des relations « primaires » et de prendre en compte les effets dominos possibles. Ainsi, l'identification de scénarios de danger n'est vraiment pas aisée. De plus, l'étendue géographique des villes et le fait que les réseaux d'eau ne soient pas des systèmes « fermés », bien définis, rendent difficile l'établissement de limites claires de l'étude.

C'est pourquoi, il vaut mieux opter pour une approche simplifiée. Plutôt que de vouloir tenter de répondre de manière générale à la question, il est plus judicieux d'aborder le problème de manière plus ciblée. Il apparaît plus censé d'étudier chaque IE l'une après l'autre vis-à-vis du réseau d'eau potable plutôt que de vouloir les étudier toutes à la fois.

4.2.2 Nécessité d'étudier une mission réseau à la fois

De la même manière, il est vain de vouloir considérer, dans l'étude, l'ensemble des problèmes pouvant survenir sur un réseau d'eau potable. Il faut considérer ces problèmes

de façon séparée. L'étude des dysfonctionnements du réseau peut mener à des résultats différents suivant les considérations de problèmes de pression, de volume, de qualité ou de confinement. Il est illusoire de vouloir traiter tous ces problèmes potentiels de front.

Avant d'aller plus loin dans la démarche, il est nécessaire de définir les missions principales du réseau d'eau potable :

- Mission de Pression : le réseau doit fournir en tout temps une pression acceptable aux usagers ;
- Mission de Quantité : le réseau doit fournir en tout temps des volumes suffisants d'eau potable ;
- Mission de Qualité : le réseau doit fournir en tout temps une qualité d'eau acceptable aux usagers sans mettre leur santé en danger ;
- Mission de Confinement : l'eau qui circule dans le réseau de conduites doit être maintenue dans le réseau et ne doit pas s'en échapper de manière incontrôlée.

Les défaillances du réseau à une de ses missions constituent des problèmes pouvant, dans certains cas, engendrer de graves conséquences sur le fonctionnement d'une IE.

4.2.3 Précisions supplémentaires sur l'étude

La démarche commence donc par le choix d'un type d'IE à considérer et d'un problème particulier pouvant être posé par le réseau. En aucun cas cette étude ne prétend comparer des IE entre elles et les hiérarchiser. Le but de la démarche n'est pas de se prononcer sur le fait que l'IE qui constitue le réseau de santé est, ou n'est pas une infrastructure plus importante que les IE de protection incendie ou d'énergie vis-à-vis du réseau d'eau potable. C'est pourquoi il est tout à fait concevable de s'intéresser aux IE de façon séparée.

Dans la perspective de l'utilisation de cette démarche par une ville ou municipalité, il reviendra aux décideurs (élus, experts, etc.), de choisir de privilégier un certain type d'IE par rapport à une mission réseau particulière. Ils pourront, par exemple, choisir d'étudier

le réseau des télécommunications face à la mission Confinement ou Qualité. Parallèlement, ils pourront lancer l'étude de leur réseau de santé vis-à-vis d'un problème de qualité ou de pression, etc. Toutes les combinaisons possibles entre IE et missions réseau apporteront des points de vue différents et par conséquent, des réponses différentes. La méthode n'a pas non plus la prétention de conseiller la ou les missions réseau à associer aux types d'IE considérées. De même, si plusieurs études sont lancées en parallèles, seuls les décideurs seront en mesure de choisir où entreprendre d'éventuels travaux. Aucun moyen ne sera développé dans cette démarche pour comparer entre eux les résultats issus de plusieurs combinaisons IE/missions réseau. Suivant les résultats obtenus, ils aviseront s'il faut ou non entreprendre des actions nécessaires pour réduire les risques. La démarche proposée ici sert d'outil d'aide à la décision.

4.3 ÉTUDE DE L'INFRASTRUCTURE ESSENTIELLE CHOISIE

4.3.1 Des informations à collecter

Une fois l'IE choisie, il est nécessaire d'acquérir des données à son sujet. Le but de la collecte de ces données est de se renseigner sur l'IE et d'identifier ses éléments clés. L'étude de l'IE doit être réalisée indépendamment du réseau d'eau potable. L'IE doit être perçue au sens le plus général du terme, c'est-à-dire qu'il s'agit bien de réseaux d'infrastructures tels les réseaux de santé, de communication, d'énergie, etc.

Pour la suite de l'étude, il est nécessaire de définir un vocabulaire qui permette de caractériser la constitution d'une IE. Ainsi, il est considéré qu'une IE est composée d'éléments reliés entre eux par différents moyens. Chaque élément joue un rôle particulier au sein de l'IE et l'accomplissement de la mission pour laquelle il a été créé assure en partie le bon fonctionnement général de l'IE. Les éléments peuvent avoir des niveaux d'importances différents pour le fonctionnement de l'IE et peuvent être de

natures différentes. Le Tableau 4.1 donne un exemple de décomposition de l'IE santé en différents éléments.

Tableau 4.1 : Exemple de découpage d'une IE en éléments.

Infrastructures Essentielles	Éléments constituant l'IE
Santé	Hôpitaux généraux, Hôpitaux spécialisés, Cliniques, Centres de soins, Maternités, Urgences, Centre de réception des appels, etc.
Énergie	Usines de production, Transformateurs de différents niveaux, Lignes hautes, moyennes et basses tensions, Centres et Postes de contrôle et de surveillance, etc.

Il faut être le plus complet possible dans la décomposition des IE en ses éléments. Si certains éléments semblent primordiaux de par leurs rôles, d'autres, qui, à première vue, ne sont pas cruciaux, ne doivent pas être écartés pour autant. Des éléments de protection peuvent être tout aussi importants que des éléments de production. C'est pourquoi il faut que cette décomposition de l'IE soit réalisée par les personnes responsables de cette IE.

4.3.2 Hiérarchisation des éléments

Une fois les éléments constituant l'IE identifiés, ils doivent être classés par rapport à leurs positions stratégiques vis-à-vis de l'IE. Ce classement est nécessaire car il constitue le premier critère retenu dans l'objectif de hiérarchisation de zones ou conduites du réseau à réhabiliter : le critère de localisation des éléments clés de l'IE.

Seules les personnes qui ont la responsabilité des IE sont en mesure d'établir un tel classement. Aussi, aucune méthode de classement n'est conseillée ici. Les dirigeants

doivent fournir le classement qui leur paraît le plus approprié et il leur revient d'en fixer les critères (vis-à-vis de quoi vont-ils effectuer le classement ? Quel aspect privilégier ?).

Le classement demandé ne doit pas forcément être très détaillé. Le nombre de niveaux d'importance reste là encore à l'appréciation des dirigeants d'IE. Certains éléments peuvent avoir le même niveau d'importance pour l'IE. Ce classement ne sera pas chose aisée mais des choix devront être entrepris, même s'ils sont discutables, car cette hiérarchisation est indispensable à la suite de la démarche.

La Figure 4.3 schématise cette étape. L'IE est décomposée en différents éléments A, B, C, etc. Un niveau d'importance (noté Niv 1, 2, 3, ou 4) est attribué à chaque élément selon son importance pour l'IE elle-même. Dans le cas de la Figure 4.3, l'élément B de niveau d'importance 1 pour l'IE est l'élément le plus important. Viennent ensuite les éléments C et F, puis A et E et enfin D. Pour la suite de l'étude, les décideurs peuvent choisir de n'étudier que les éléments d'importance supérieure au niveau 3, ou 2 ou 1 au choix.

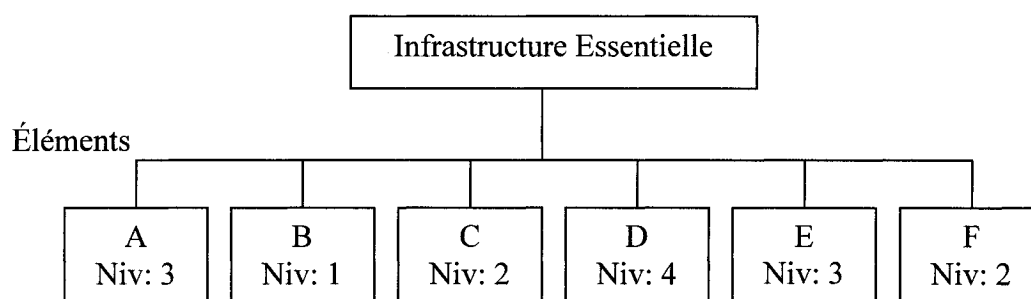


Figure 4.3 : L'IE constituée d'éléments classés par ordre d'importance.

L'étude va se poursuivre en proposant une caractérisation des relations liant les éléments de l'IE considérée et l'eau potable.

4.4 VULNÉRABILITÉ DE L'INFRASTRUCTURE ESSENTIELLE PAR RAPPORT À LA MISSION RÉSEAU

4.4.1 Sélection des éléments sensibles à la mission réseau étudiée

Pour chaque mission réseau, il est possible d'identifier les perturbations engendrées par le non respect de ces missions. Le Tableau 4.2 donne une liste, qui peut être complétée, des perturbations possibles liées aux missions réseau.

Tableau 4.2 : Perturbations engendrées par le non-respect des missions réseau.

Missions réseau d'eau potable	Perturbations les plus communes engendrées par le non-respect des missions réseau
Pression	Chute/augmentation de pression, pas de pression, diminution du volume d'eau disponible aux robinets, refoulements.
Quantité	diminution du volume d'eau disponible aux robinets.
Confinement	inondations, ruissellements.
Qualité	eau non potable (contaminations), température élevée, particules, coloration, etc.

Ce tableau ne donne pas une liste complète des perturbations car les missions du réseau sont souvent liées. Un problème de pression peut engendrer un problème de quantité, mais également un problème de qualité. Une chute de pression peut favoriser l'intrusion de particules au sein du réseau par les fissures ou défauts de joints de celui-ci. Néanmoins, dans le cadre de l'étude, seules les perturbations directes seront retenues

pour éviter de complexifier le problème. Pour connaître l'effet d'un problème de pression sur la qualité de l'eau, il faudra refaire l'étude en s'intéressant à la mission Qualité du réseau.

La connaissance des perturbations possibles engendrées par le non-respect de la mission réseau étudiée permet maintenant la sélection des éléments sensibles à ces éventuelles perturbations. Il faut donc relever, parmi les éléments de l'IE, ceux qui pourraient présenter une vulnérabilité face aux problèmes réseau étudiés. Les dirigeants de l'IE doivent donc s'interroger sur la façon dont l'eau est utilisée par les éléments. Vis-à-vis de la mission réseau considérée, certains éléments ne présenteront aucune vulnérabilité directe et seront écartés de l'étude. Les éléments pouvant présenter une vulnérabilité sont étudiés plus profondément afin de caractériser cette vulnérabilité.

4.4.2 Caractérisation de la vulnérabilité des éléments face à la mission réseau considérée

Il faut étudier le niveau de vulnérabilité de chaque élément sélectionné précédemment. Pour cela, il faut s'interroger sur les façons dont les problèmes liés à la mission réseau étudiée vont affecter les éléments et parvenir à qualifier ces affectations en terme de niveaux de vulnérabilité. Pour chaque élément sélectionné, il s'agit de se poser les questions suivantes :

- par rapport aux défaillances associées à la mission réseau considérée, quels peuvent être les niveaux d'affectation de l'élément ?
- jusqu'à quel point le niveau d'affectation est jugé comme étant acceptable, tolérable, inacceptable ?

Par exemple, en s'intéressant à la mission Pression, jusqu'à quelles pressions l'élément peut-il fonctionner de manière correcte ?

Les niveaux d'affectations ou de fonctionnements doivent être définis par les dirigeants de l'IE en question pour chaque élément. Dans ce cas, ces niveaux sont propres à chaque

élément et ce n'est pas le niveau d'affectation global de l'IE qui doit être évalué. La méthode tient compte du niveau d'affectation global de l'IE vis-à-vis de ses éléments lorsque le classement des éléments par niveaux d'importance pour l'IE est établi.

Un outil adapté pour modéliser les niveaux de vulnérabilités des éléments face au problème considéré est l'utilisation de courbes de conséquences. Ces courbes de conséquences permettent de relier des niveaux d'affectations aux paramètres des problèmes du réseau. La Figure 4.4 donne une représentation schématique de ces courbes.

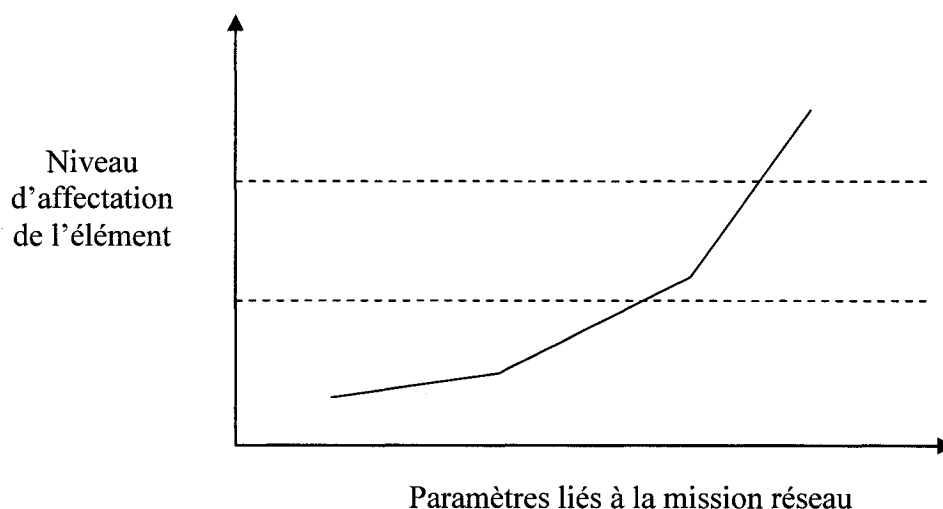


Figure 4.4 : Représentation générale des courbes de conséquences.

Les paramètres liés à la mission réseau peuvent être multiples :

- mission Pression : niveau de pression (kPa), volume d'eau (m^3) ;
- mission Quantité : volume d'eau (m^3) ;
- mission Confinement : niveaux d'inondations (cm), résistance au ruissellement ;
- mission Qualité : niveaux de contamination, température de l'eau, etc.

L'utilisation de telles courbes a un double avantage : (i) un moyen graphique rend l'approche très lisible et (ii) leur construction nécessite d'avoir établi une véritable structuration des relations entre les niveaux de fonctionnements et les problèmes réseau. La construction de ces courbes constitue un point crucial de la démarche car c'est à partir d'elles que débute l'approche par conséquences, points de départ des scénarios de « remontée » des conséquences. Elles permettent de caractériser le niveau inacceptable d'affectation des éléments avec des paramètres liés à la mission du réseau.

L'application présentée dans le chapitre 5 de ce document montrera la difficulté de les construire et aussi le fait que ces courbes peuvent, en fait, se constituer de plusieurs courbes.

4.5 ÉTUDE DU RÉSEAU D'EAU POTABLE

Une fois la caractérisation des éléments clés constituant une IE obtenue en relation à la mission réseau considérée, il faut « remonter » vers les possibilités et événements qui pourraient se produire sur le réseau d'eau potable et affecter ces éléments.

4.5.1 Identification des sources des problèmes liés au réseau d'eau potable

Que peut-il se produire sur le réseau qui nuise à la mission réseau étudiée ? Il faut s'interroger sur les accidents ou plutôt les événements pouvant survenir sur le réseau qui entraîneraient le non-respect de la mission considérée. Pour chaque mission réseau, plusieurs événements ou combinaisons d'événements peuvent mener aux conséquences pré-établies. Le Tableau 4.3 donne quelques événements associés aux missions réseau et perturbations qu'ils peuvent causer.

Tableau 4.3 : Évènements sur le réseau entraînant le non-respect des missions réseau.

Missions réseau	Perturbations les plus communes engendrées par le non-respect des missions réseau	Évènements pouvant causer ces perturbations
Pression	Chute/augmentation de pression, diminution des volumes d'eau, refoulements.	Demandes incendies, ruptures soudaines de conduites principales, ruptures de réservoirs, réparations/remplacements, opérations de vannes, etc.
Quantité	Diminution des volumes d'eau.	Ruptures de conduites principales, de réservoirs, réparations/remplacements etc.
Confinement	Inondations, ruissellements.	Ruptures de conduites principales, de réservoirs, etc.
Qualité	Eau non potable (contaminations), température élevée, etc.	Ruptures de conduites, pressions faibles ou négatives et présence de fuites, réparations/remplacements de conduites, programmes de rinçage, etc.

Suivant la mission réseau étudiée, le recensement le plus complet possible de tels évènements demandera un certain niveau de connaissances sur le réseau. Ce travail de

recherche ne sera pas forcément aisée car il faut opter pour une approche au cas par cas : chaque élément de l'IE se situe dans une localisation particulière avec une configuration réseau propre à sa situation. La recherche de ces événements va permettre d'établir certains critères réseau. Les critères réseau peuvent être de toute sorte : diamètre des conduites, localisations des conduites, niveau de maillage du réseau, distances des conduites aux réservoirs, etc.

Il est important de noter que ces critères réseau ne demandent pas forcément une connaissance très poussée de son état général. Des informations, telles que les taux de fuites, de ruptures aux 100km par secteur, les niveaux de corrosions des conduites ou autres, qui nécessitent des campagnes de terrain, ne sont pas essentielles. Bien sûr, si des données valides et précises sont disponibles, il faudra en tenir compte, ce qui apportera plus de précisions sur les résultats obtenus au final. Mais il est aussi possible d'en faire abstraction, et c'est ce qui constitue un point fort de la démarche : la flexibilité.

Voici un exemple simple et théorique. En s'intéressant à la mission Confinement, les conduites de grands diamètres situées à proximité de l'élément d'une IE jouent un rôle prépondérant en considérant des problèmes d'inondations ou de ruissellements. Cette remarque amène deux informations : (i) seules les conduites dont l'écoulement de l'eau se dirigerait vers l'élément après une rupture peuvent causer des dégâts, (ii) parmi ces conduites, celles de grands diamètres représentent un « danger » prépondérant. Le terme « danger » est mis entre guillemets car il devra être défini en fonction de l'élément (localisation, niveau de vulnérabilité, etc.) Il ne faut pas non plus écarter les conduites secondaires qui pourraient poser également des problèmes d'inondations principalement, plus que de ruissellements. Cependant, il est possible de penser que ces conduites secondaires représenteront un « danger » plus local autour de l'élément que les conduites principales. Mais cela dépend encore de la localisation même de l'élément considéré ainsi que de la configuration du réseau de conduites.

4.5.2 Identification des facteurs externes au réseau d'eau potable

Suivant les missions réseau, différents facteurs externes (à l'élément et au réseau d'eau potable) peuvent aggraver ou minimiser les effets de certaines perturbations. Là encore, le raisonnement le plus général et complet possible doit être mené. Il ne faut pas mettre de côté directement des facteurs qui semblent *a priori* peu importants. Il faut d'abord dresser la liste complète de ces facteurs, puis juger de leurs importances par rapport au problème considéré. L'étude de ces facteurs nécessite l'implication d'experts liés à leurs domaines propres ce qui renforce encore l'aspect multidisciplinaire de la démarche.

Mais concrètement, quels peuvent être ces facteurs externes ? En poursuivant sur l'exemple de l'étude de la mission Confinement, vis-à-vis de problèmes d'inondations ou de ruissellements sur un élément, différents facteurs externes existent. La pente a un impact indéniable sur la vitesse du ruissellement. Elle peut également avoir un effet sur la rapidité de la montée des eaux. Les taux d'occupations des sols constituent là encore un facteur externe aggravant ou minimisant suivant les cas. Lors d'accidents de ruptures, les flots peuvent être orientés dans une direction particulière suivant les dispositions des rues qui peuvent canaliser une quantité plus importante d'eau vers l'élément étudié. Il serait intéressant dans ce cas de récupérer des données de topographie et d'hydraulique urbaine. Les types de surfaces au sol sont un troisième facteur externe. Les surfaces lisses et plutôt imperméables de types enrobés bitumineux, favorisent le ruissellement des eaux alors que des secteurs pavés ou des espaces verts sont plus propices à permettre l'infiltration de l'eau dans les sols, et peuvent ainsi atténuer le ruissellement. Les capacités hydrauliques de captage des eaux de pluies sont un autre facteur externe (limitant). La présence de caniveaux, collecteurs d'eau de pluie, bouches d'égouts et autres bassins de rétentions limitera les effets de ruissellements et inondations. La prise en compte de ces facteurs supplémentaires permet d'évaluer de manière plus fine la notion de « danger » issue du non-respect d'une mission réseau.

4.6 SYNTHÈSE DES DONNÉES

4.6.1 Obtention de critères

Les éléments clés constituant l'IE étudiée ont été classés par les responsables de l'IE vis-à-vis de leurs importances respectives pour l'IE elle-même. Puis, pour certains éléments, leurs vulnérabilités propres face à la mission réseau considérée ont été évaluées et caractérisées grâce, entre autre, à la mise en place de courbes de conséquences. Enfin, les sources des problèmes engendrés suite au non respect de la mission réseau considérée et les facteurs aggravants/limitants associés ont été identifiés.

La succession de ces étapes a permis de rassembler des critères de différentes natures afin de minimiser les risques de dysfonctionnements des IE dus à des défaillances du réseau d'alimentation en eau potable. Ces critères vont permettre le classement de zones ou de conduites particulièrement critiques vis-à-vis de l'IE, en fonction de la mission réseau considérée, zones ou conduites qu'il faudra réhabiliter en priorité.

Comme le symbolise la Figure 4.5, ces critères proviennent principalement de quatre sources distinctes : (a) l'IE elle-même (éléments la constituant), (b) le niveau de vulnérabilité des éléments de l'IE, (c) les sources du non-respect de la mission réseau considérée et (d) les facteurs aggravants/limitants externes. L'étape (a) de décomposition de l'IE en éléments et de leur classement selon leurs importances pour l'IE donne tout d'abord un critère de localisation de ses éléments clés. L'étape suivante (b) d'évaluation de la vulnérabilité de ces éléments face à la mission réseau considérée permet alors une caractérisation différente. Un critère « vulnérabilité » est obtenu. Il se peut que certains éléments clés ne présentent que de faibles vulnérabilités. D'autres, par contre, seront plus susceptibles de subir des complications à la suite du non-respect de la mission réseau considérée. Ces 2 étapes permettent de préciser les enjeux à préserver face aux menaces (aléas) constitués par le non-respect des missions du réseau d'eau potable.

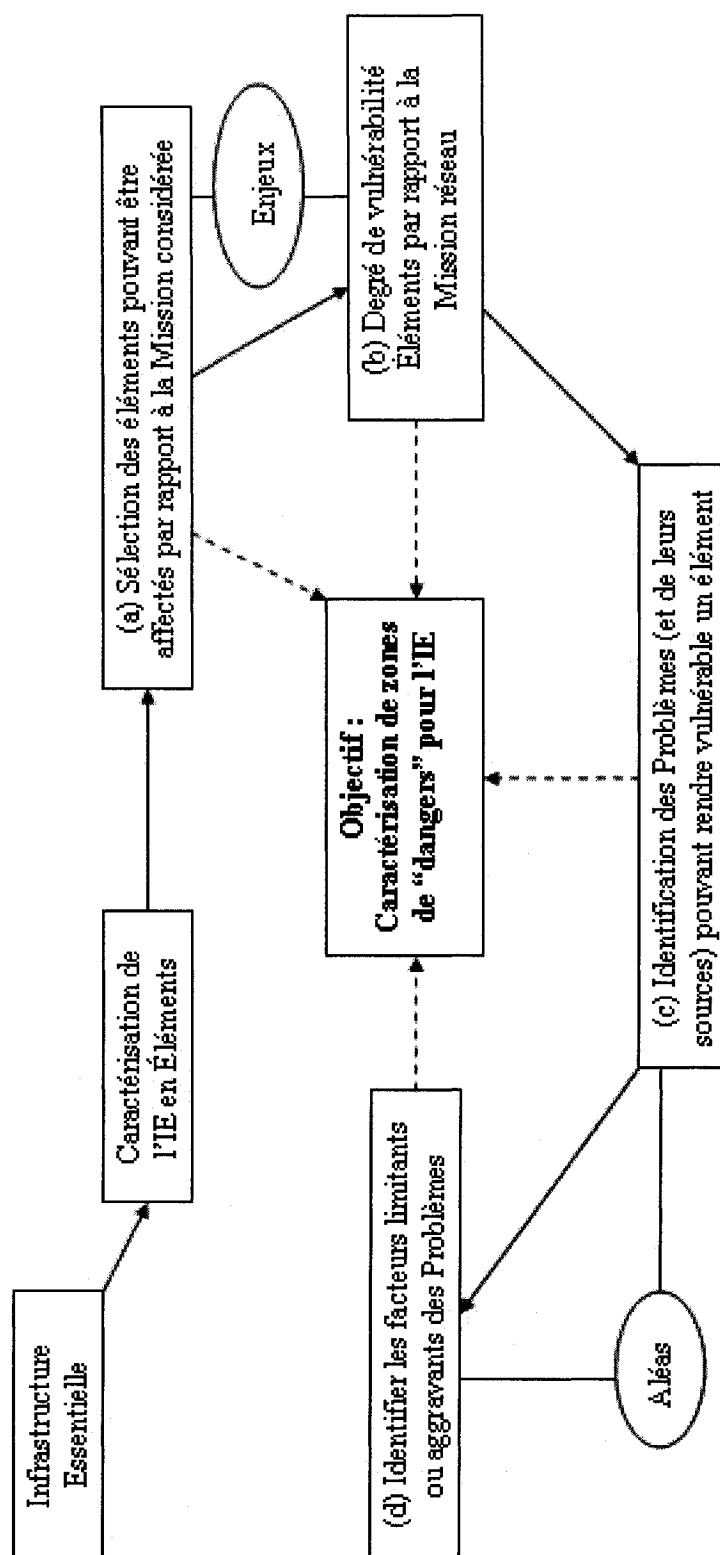


Figure 4.5 : Étapes pour la caractérisations de zones de dangers

L'étude (c) des sources de non-respect de la mission réseau considérée permet de localiser, autour des éléments ciblés, des zones ou lieux ponctuels du réseau d'eau potable stratégiques pour le bon fonctionnement des éléments (critères liés au réseau d'eau potable). L'identification et la localisation de facteurs externes (d) vont permettre l'obtention de nouvelles caractérisations des zones d'études autour des éléments (critères liés aux facteurs externes). Ces quatre provenances d'informations devraient permettre d'obtenir suffisamment de critères pour départager, avec la précision souhaitée, des zones de présences de dangers potentiels pour l'IE en général, vis-à-vis de la mission réseau considérée. Sur le schéma, les flèches en pointillés symbolisent les provenances des critères suivant la succession des étapes de la démarche symbolisée par les flèches pleines. La diversité dans les origines des critères souligne bien la multidisciplinarité d'une telle démarche, multidisciplinarité nécessaire si l'on veut obtenir des résultats complets, sans laisser aucune direction de recherche inexplorée.

4.6.2 Analyse des résultats

Pour réaliser une analyse de la situation de l'IE face à la mission du réseau d'eau potable considérée, il faut regrouper les critères obtenus sur une même carte rassemblant toutes les données. Chaque critère obtenu accroît la précision des résultats. Cependant, la prise en compte d'un trop grand nombre de critères risque de complexifier grandement l'analyse des résultats. Il se peut aussi que le jumelage de plusieurs critères engendre des points tendancieux. En continuant sur l'exemple de l'aspect confinement de l'eau, en considérant les critères de diamètres et de vétusté des conduites dont la rupture pourrait inonder un élément clé d'une IE, la situation suivante peut se produire : une conduite de diamètre moyen et d'état vétuste se situe à proximité de l'élément et une conduite de diamètre supérieur mais moins détériorée menace également l'élément. Comment, alors, est-il possible de choisir la conduite à réparer en priorité ? Cela dépend des niveaux de vétusté considérés ainsi que de l'ampleur des conséquences, en terme d'inondation, que

pourrait produire la rupture des conduites. Bref, il faudra évaluer l'importance de chaque critère (taille du diamètre/vétusté de la conduite) pour déterminer la conduite à prioriser.

Ainsi, selon les études de cas et les disponibilités des données, un certain nombre de critères sont rassemblés. Pour départager les critères et se concentrer sur les plus significatifs, des discussions entre les différents intervenants les ayant mis au point devront avoir lieu. Ces discussions devront aussi permettre de se prononcer sur les cas litigieux tels qu'évoqué précédemment. Le classement du poids de chaque critère devra être réalisé au cas par cas en prenant en considération différents paramètres : la façon d'établir le critère, la représentativité des échelles de niveaux retenues pour le caractériser, la justesse et la certitude de la validité des données, etc. Il serait vain d'attribuer des poids particuliers à certains critères de façon systématique et permanente. Il serait toujours possible de trouver des configurations où des critères, significatifs dans certains cas, ne le seraient pas dans d'autres. C'est pourquoi, une discussion entre intervenants semble le moyen approprié pour mener à bien cette hiérarchisation afin d'éviter de négliger tout aspect de l'étude.

Une fois les critères retenus classés, une hiérarchisation de zones ou de conduites doit être effectuée. La hiérarchisation obtenue n'en est qu'une parmi la multitude possible pouvant découler des différents critères retenus, mais elle sera certainement la plus représentative de la réalité vis-à-vis de la problématique retenue. Il se peut évidemment qu'un incident non prévu survienne, mais si la démarche est appliquée correctement et les mesures devant suivre son application (réhabilitations, remplacements, etc.) sont effectuées, la plupart des accidents majeurs devraient être évités. Éventuellement, si la hiérarchisation obtenue n'est pas satisfaisante pour différentes raisons (manque de précision, trop de précisions, etc.), comme annoncé précédemment en commentaire de la Figure 4.2 (page 37), un bouclage peut être effectué afin d'ajuster la problématique, les critères, de lancer des études de relevés de données ou d'améliorer tout autre aspect de l'étude, pour obtenir un résultat convenable.

CHAPITRE 5 ILLUSTRATION DE LA DÉMARCHE D'ANALYSE DE RISQUE

5.1 CHOIX DE LA PROBLÉMATIQUE ET ÉTUDE DE L'INFRASTRUCTURE ESSENTIELLE CHOISIE

5.1.1 La problématique

Il est nécessaire de n'étudier qu'une IE à la fois, vis-à-vis d'une seule mission réseau à la fois. Il appartient aux « décideurs » (experts, élus des municipalités, etc.) de choisir de lancer ce type d'étude sur une IE, vis-à-vis d'une mission réseau parmi les quatre missions principales d'un réseau d'eau potable. Pour cette application, les décideurs n'ont pas été consultés, l'application ayant simplement pour but d'illustrer la démarche et de montrer plus en détails son fonctionnement et ses avantages. Dans le cadre d'une application de la démarche à une municipalité, il aurait été nécessaire d'effectuer ces consultations.

Le choix de la problématique a été arrêtée comme suit : l'étude du réseau Santé de la municipalité de Montréal vis-à-vis de la mission Qualité de l'eau potable. Le choix de la ville de Montréal est dû au fait que cette municipalité fait à la fois partie des partenaires de la Chaire Industrielle CRSNG en Eau Potable et du Centre risque & performance. Le choix de l'étude de l'aspect de la mission Qualité pour le réseau Santé a été fait en raison de l'importance actuelle de cette problématique fondamentale pour les municipalités. Il semble en effet raisonnable de penser qu'une variation de la qualité de l'eau potable desservie par le réseau de distribution aura sans doute des conséquences plus importantes sur l'IE Santé. Il est rappelé que la mission Qualité du réseau d'eau potable a été définie comme suit : le réseau doit fournir en tout temps une qualité d'eau acceptable aux usagers sans mettre leur santé en danger (§ 4.2.2).

5.1.2 Étude de l'Infrastructure Essentielle choisie

Il est nécessaire d'acquérir des connaissances sur le réseau Santé de la municipalité de Montréal pour procéder à son découpage en éléments et en classant ses éléments suivant leurs importances pour l'IE elle-même (§ 4.3). Le découpage en éléments de ce réseau doit être effectué par les responsables mêmes de cette IE. Cependant, ils n'ont pas été contactés pour mettre en place cette application. Le but de cet exemple est simplement de valider la démarche d'analyse de risque proposée et pas d'étudier précisément une IE avec ses points forts et points faibles. De plus, il apparaît nécessaire, dans le cadre de cette étude, de préserver une certaine confidentialité concernant les données recueillies. C'est pourquoi, tout au long de cette application, aucun nom qui puisse permettre d'identifier un secteur ou une zone de la ville de Montréal ne sera indiqué. Les noms des rues ou autre seront indiqués de façon anonyme. Le cas développé ici sera simplement un cas semi réel, présentant, selon les cas, des données fictives ou réelles. Néanmoins, l'objectif visé d'illustrer les possibilités de la démarche n'en sera pas affecté.

Pour les mêmes raisons, le classement des éléments de l'IE Santé n'a pas été réalisé dans cette application, cela n'étant pas primordial pour montrer le potentiel de la démarche. Il a simplement été choisi de se recentrer sur l'étude d'un hôpital en particulier, hôpital nommé par la suite « hôpital H ».

5.2 VULNÉRABILITÉ DE L'INFRASTRUCTURE ESSENTIELLE PAR RAPPORT À LA MISSION QUALITÉ

5.2.1 Sélection des éléments sensibles à la mission Qualité

Une application de la démarche aurait nécessité de solliciter les responsables de la municipalité et de l'IE santé pour choisir les éléments à étudier plus en profondeur en fonction de la mission Qualité. Les questions suivantes devraient être posées : parmi les éléments du réseau Santé de Montréal, lesquels sont vulnérables aux problèmes de

qualité sur le réseau d'eau potable ? Plus précisément, et en référence au Tableau 4.2 (page 43), quels éléments peuvent être affectés par une baisse de qualité de l'eau (contamination), par une augmentation de la température de l'eau, par une augmentation de la teneur en particules, etc. ?

Le réseau Santé de Montréal est subdivisé en hôpitaux (éléments) qui le composent. Tous ces éléments pourraient subir certains préjudices en cas de chute de qualité de l'eau potable, etc. Un hôpital en particulier sera affecté à un certain niveau sur son fonctionnement. Comment un problème de qualité peut affecter le fonctionnement d'un hôpital, et l'hôpital H plus particulièrement ? Il faut s'interroger sur les liens entre l'utilisation de l'eau, du point de vue de sa qualité, au sein d'un hôpital. Le guide technique français du Ministère de la Santé et des Solidarités (Ministère de la Santé et des Solidarités 2005) donne quelques notions sur le sujet. Il existerait quatre catégories d'eau en fonction des usages :

- Qualité 1 : eaux ne subissant aucun traitement dans l'établissement de santé ;
- Qualité 2 : eaux traitées au sein de l'établissement de santé répondant à des critères définis en fonction des usages alimentaires, sanitaires et de soins ;
- Qualité 3 : eaux stériles ;
- Qualité 4 : eaux techniques (Ministère de la Santé et des Solidarités 2005).

Suivant les domaines, les qualités d'eau nécessaires aux opérations médicales varient. Ce document présente un tableau indiquant la qualité requise de l'eau suivant les différents usages (endoscopie digestive, stomatologie, stérilisation, entretien des locaux, etc.) Le tableau 5.1 donne un exemple de qualité d'eau requise pour l'endoscopie digestive. Une baisse de la qualité de l'eau du réseau pourrait compliquer les opérations de colonoscopies. Il faudrait très certainement retraiter cette eau à l'hôpital, engendrant des manipulations supplémentaires, coûteuses en temps et sur le plan financier. Le niveau de fonctionnement de l'hôpital serait alors affecté. De plus, l'eau de « base » à partir de laquelle les qualités « supérieures » sont obtenues reste l'eau potable du réseau de distribution. Par conséquent, une chute de qualité de l'eau potable peut avoir des

répercussions sur l'ensemble des qualités nécessaires aux hôpitaux. Il serait intéressant que les gestionnaires d'hôpitaux s'interrogent sur l'impact qu'aurait la mise en place d'un traitement supplémentaire de l'eau sur le fonctionnement global de l'hôpital.

Tableau 5.1 : Qualité d'eau requise pour les opérations d'endoscopie digestive (adapté de Ministère de la Santé et des Solidarités 2005).

Opérations d'endoscopie digestive	Qualités d'eau conseillée
Colonoscope	Qualité 1
Fibroscope gastrique	Qualités 1 et 3
Lavage gastrique	Qualité 3

D'autres équipements pour lesquels le paramètre qualité n'est pas forcément lié à une contamination peuvent également affecter le fonctionnement des hôpitaux. Les systèmes utilisant l'eau comme moyen de refroidissement peuvent être affectés en cas de hausse de température de l'eau. Il serait donc pertinent que les gestionnaires caractérisent l'impact sur le fonctionnement global d'un hôpital de mauvais fonctionnements de ce type d'appareils. Par exemple, jusqu'à quelles températures et quels niveaux d'humidité les salles d'opérations peuvent-elles fonctionner correctement ?

Le but de cette application étant simplement de valider la démarche d'analyse de risque proposée, seul le cas de contamination par ingestion d'eau potable sera abordé. Cependant, il serait intéressant de caractériser les autres possibilités de perturbation du fonctionnement des hôpitaux, notamment celles liées aux différents usages de l'eau pour les opérations ou pour les équipements consommateurs d'eau.

5.2.2 Caractérisation de la vulnérabilité des éléments face à la mission Qualité

L'élément hôpital H présente une certaine vulnérabilité vis-à-vis du non respect de la mission Qualité du réseau d'eau potable suite à la consommation, par son personnel ou ses patients, d'eau contaminée. Suivant que l'étude s'intéresse au personnel ou aux

patients, elle va sensiblement varier. Les patients, plus faibles que des personnes saines, comme le personnel qui les soigne, seront plus facilement infectés par des agents contaminants se retrouvant accidentellement dans l'eau potable. Pour l'hôpital, cela se traduirait par un nombre supplémentaire de malades, voire la propagation d'une épidémie. Une épidémie de *Cryptosporidium* serait une surcharge majeure et augmenterait la pression sur les soins intensifs en entraînant possiblement une hausse de mortalité. Le personnel, quant à lui, assure le fonctionnement de l'hôpital et une contamination affecterait donc directement son fonctionnement, par une baisse des soins prodigués et une contamination possible des patients. Les lignes qui suivent expliquent l'approche réalisée pour le personnel de l'hôpital H.

Il faut tout d'abord trouver le lien entre le personnel d'un hôpital, le fonctionnement général de l'hôpital et le non respect de la mission Qualité par le réseau. En appliquant une approche par conséquences, il est bon de vouloir caractériser le fonctionnement d'un hôpital en fonction de son personnel. Puis il sera possible d'étudier le personnel vis-à-vis d'une contamination du réseau d'eau.

5.2.2.1 Le fonctionnement d'un hôpital et son personnel

Le lien entre le fonctionnement d'un hôpital et son personnel est simple : en absence d'une partie de son personnel, le fonctionnement d'un hôpital est affecté. Il est donc possible d'établir des niveaux d'affectations en fonction du nombre de personnes absentes. Des courbes de conséquences de l'absence du personnel sur le fonctionnement de l'élément hôpital H peuvent être établies. La Figure 5.1 montre comment elles pourraient se présenter.

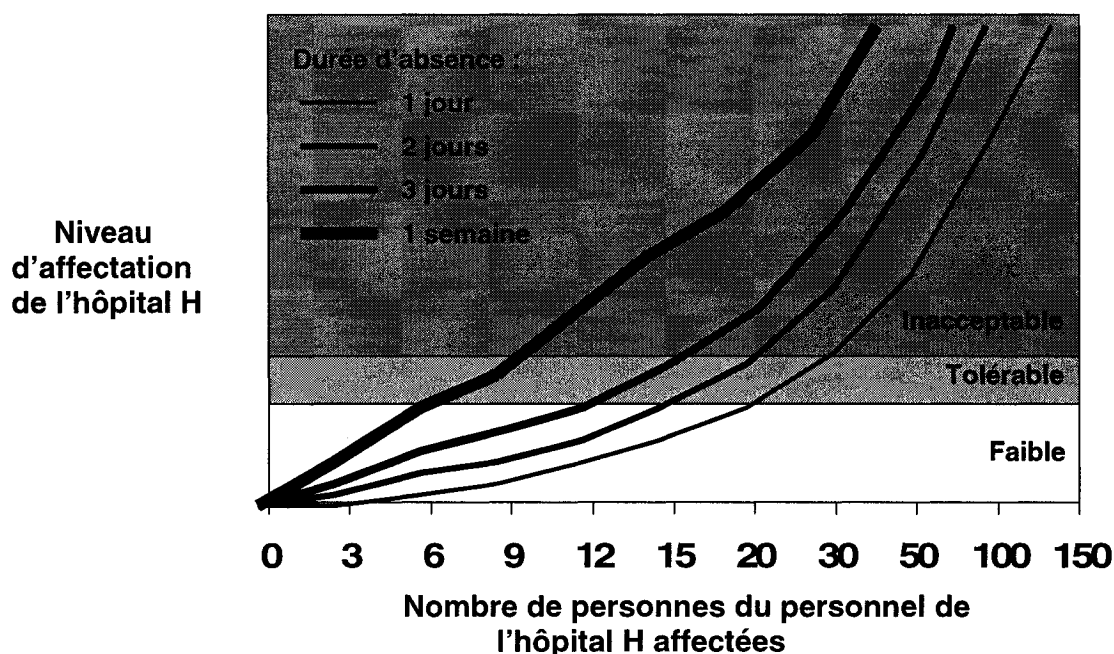


Figure 5.1 : Courbe de conséquences reliant le personnel et le niveau de fonctionnement d'un hôpital.

- **Axe des ordonnées** : niveau d'affectation de l'infrastructure exprimée par niveaux (faible, tolérable ou inacceptable). La signification de chaque niveau doit être définie avec précision par les responsables de l'hôpital : par exemple, le niveau faible correspond à la fermeture d'un bloc opératoire sur huit, alors que le niveau inacceptable correspond à la fermeture d'un service entier de l'hôpital, etc.

- **Axe des abscisses** : nombre de personnes affectées qui ne sont pas en mesure d'assurer leurs fonctions, bref, qui sont absentes.

Les courbes sont ajustées pour tenir compte de la durée d'affectation ou d'absence (1 jour, 2 jours, etc.). Des hypothèses sont réalisées : 3 niveaux d'affectations possibles (faible, tolérable et inacceptable) et le personnel soignant s'élève à 150 individus. Sachant que cette application a pour seul but de valider l'approche proposée et qu'un niveau de confidentialité doit être observé, les significations des différents niveaux d'affectations et les courbes ont été construites de façon arbitraire. Également, seul le personnel pris dans sa « totalité » a été étudié : quelles que soient leurs fonctions

(médecins, chirurgiens, infirmières, secrétaires, techniciens de surfaces, etc.), les membres du personnel comptent autant pour le bon fonctionnement de l'hôpital. Il est très concevable de considérer que, dans un hôpital, les nombres de personnes à chaque poste sont relativement proportionnels les uns aux autres. Pour chaque médecin, il y a plusieurs infirmières ou secrétaires, et, considérant que tous les membres du personnel sont égaux devant le fait d'être contaminé, les possibilités qu'un médecin soit absent peuvent être aussi grandes que celles que plusieurs infirmières le soient. Néanmoins, ces courbes peuvent également être tracées par type de postes. La construction de telles courbes permet de faire ressortir le niveau d'indispensabilité des postes et des personnes pouvant les gérer : plus un poste et des personnes sont importantes pour le fonctionnement de l'élément, plus le niveau d'affection de l'élément augmentera rapidement.

Une fois ces courbes établies, leur étude permettra de définir le type d'absence qui pourrait causer des problèmes. Pour un seuil d'affectation limite fixé avec les gérants de l'élément, il sera possible de connaître, pour chaque poste, combien de personnes peuvent être absentes et pour quelle durée. Sur l'exemple de l'hôpital H, en fixant le seuil d'affectation à inacceptable, le fonctionnement global de l'infrastructure sera perturbé si 9 personnes sont absentes 1 semaine, 15 personnes sont absentes 3 jours, 20 personnes sont absentes 2 jours, 30 personnes sont absentes 1 jour.

Les gestionnaires de l'hôpital pourraient également prendre en compte le fait qu'une personne malade peut quelque fois remplir en partie ses fonctions. De plus, lors de l'établissement des courbes pour chaque poste du personnel, dans une perspective de simplification de l'étude, il peut être considéré que les personnes possédant les mêmes niveaux de qualifications sont en mesure de se remplacer.

Pour le cas des patients, il faudrait évaluer l'impact de la surcharge de soins qu'entraînerait l'apparition d'une épidémie sur le fonctionnement de l'hôpital et procéder de façon similaire.

5.2.2.2 *Le personnel et la qualité de l'eau*

Le lien entre l'absence du personnel et la qualité de l'eau semble clair. Les personnes sont absentes car elles ont consommé une eau contaminée qui les a rendus malades. Comment caractériser la relation entre une eau contaminée et l'affectation sur une population (le personnel de l'hôpital H) ? La liste des contaminants pouvant s'introduire dans le réseau d'eau potable d'une ville est infinie. L'étude portant sur des événements entraînant des conséquences soudaines à court terme pour le fonctionnement d'une infrastructure, les contaminants engendrant des maladies à long terme type cancer ou autre seront exclus de l'étude.

Allgeier *et al.* (2005) a montré que selon les types de contaminants, leurs détections par différents moyens (appels des consommateurs aux urgences, capteurs de qualité, surveillance syndromique, etc.) peuvent s'étaler sur plusieurs jours. Une contamination chimique affecte rapidement les consommateurs (en quelques heures). Les produits chimiques présents dans l'eau doivent être relativement concentrés pour avoir un effet à court terme. Or, une grande concentration chimique sera repérée plus aisément par les utilisateurs : coloration de l'eau, plusieurs phases si produits pétroliers ou huileux, goûts, odeurs, etc. L'alerte sera donnée en quelques heures, et un nombre restreint de personnes sera affecté. Par contre, une contamination d'origine microbiologique ou de pathogènes mettra plus de temps à être repérée, dû principalement à la durée d'incubation des agents pathogènes. Les maladies peuvent se déclarer plusieurs jours après l'ingestion d'eau contaminée. La détection de la contamination demandant plus de temps, un grand nombre de personnes seront affectées. Cette étude va se concentrer sur les contaminants les plus probables qui sont principalement d'origine microbiologique et qui peuvent avoir des conséquences significatives sur les populations

Que faut-il retenir des courbes Niveau d'affectation de l'hôpital H / personnel absent ? Le niveau inacceptable est atteint lorsque peu de personnes sont absentes longtemps (9 personnes absentes/semaine) ou lorsqu'un grand nombre de personnes sont absentes simultanément (30 personnes absentes/jour). Le nombre de maladies causant des affectations de quelques heures à des affectations de plusieurs jours est très élevé. De plus, le niveau de contagion de ces maladies est directement lié au risque de transmission interne secondaire entre les membres du personnel et les patients. Étudier toutes ces maladies n'est donc pas une solution concevable.

Les phénomènes de contamination d'un humain par un agent infectieux sont complexes. Suivant les concentrations de contaminants, ses caractéristiques et les caractéristiques propres de chaque personne, les conséquences sur la santé seront différentes. Certaines personnes seront très affectées, d'autres seront infectées mais pas forcément malades, d'autres encore ne le seront pas. La Figure 5.2 montre les doses médianes d'infection pour différents organismes qui peuvent être présents dans l'eau (Crittenden *et al.* 2005). Les doses médianes d'infections N_{50} correspondent à la dose typique requise, pour un contaminant choisi, pour que 50% des consommateurs soient infectés. L'infection ne signifie pas nécessairement que la présence de l'agent pathogène dans l'individu hôte se traduise par des maladies. L'infection signifie que le pathogène se reproduit avec succès dans l'hôte. La personne peut très bien ne ressentir aucune gêne, mais elle constitue un vecteur potentiel de transmission de l'agent pathogène. Plusieurs voies subséquentes de transmission sont possibles dont la transmission par voie fécale-orale ou patient à patient lors des soins, etc. Les organismes pathogènes sont plus ou moins infectieux selon les cas comme illustré en Figure 5.2.

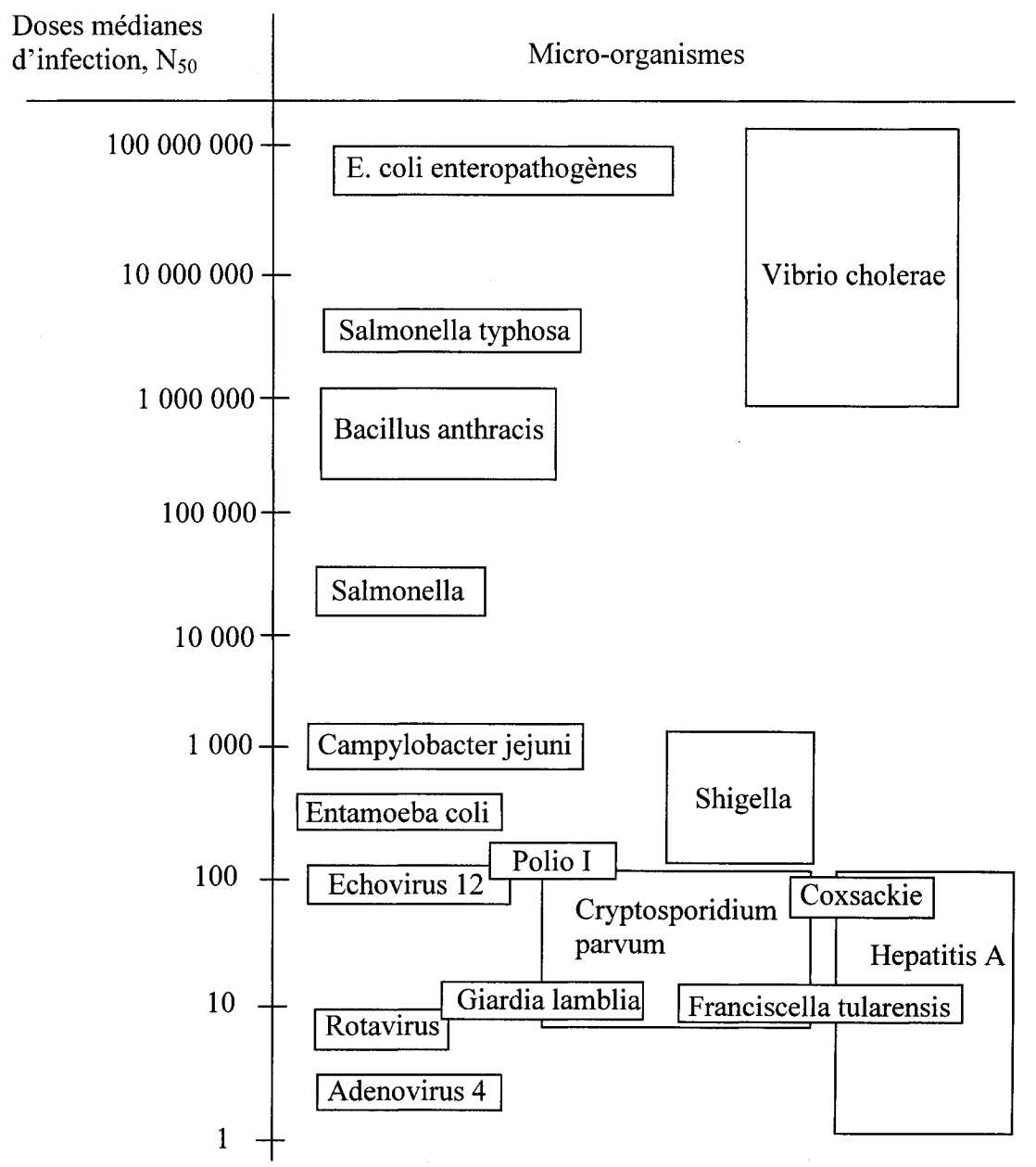


Figure 5.2 : Doses médianes d'infection pour différents organismes (adapté de Crittenden *et al.* 2005).

Globalement, les virus sont les organismes les plus virulents : l'*Hépatite A*, les *rotavirus* ou les *adenovirus* nécessitent moins de 10 entités pour infecter des personnes.

Dans le cadre de l'étude, certains organismes sont retenus en fonction de leur différence de résistance :

- *Cryptosporidium parvum*, organisme résistant au chlore ;
- *rotavirus* et *adenovirus 4*, organismes non résistants au chlore mais très infectieux ;
- *Vibrio cholerae*, organisme qui entraîne une mortalité élevée ;
- *Giardia lamblia* et *Shigella*, organismes communs ;
- *Escherichia coli* O157:H7, souche bactérienne virulente, responsable de nombreuses contaminations récentes.

Pour connaître les risques d'infection associés à l'ingestion d'un certain nombre d'organismes pathogènes, des études ont été réalisées afin de construire des courbes dose-réponse. Haas *et al.* (1999) a regroupé les résultats de ces études afin de déterminer à quelles lois statistiques semblaient correspondre les taux d'infection de ces différents contaminants. La connaissance de ces informations permet de tracer les courbes doses-réponses. Le Tableau 5.22 récapitule les données concernant les sept contaminants.

Tableau 5.2 : Données sur les courbes dose-réponse de quelques contaminants (adapté de Haas *et al.* (1999)).

Organismes	Lois se rapprochant le plus des données recueillies		
	Exponentielle K	Beta-Poisson N ₅₀ α	
Rotavirus	2,397	6,17	0,2531
Adenovirus 4			
Shigella		1,12	0,21
E.coli O157:H7		1,12	0,21
Vibrio cholerae	238	243	0,25
Cryptosporidium parvum			
Giardia lamblia		50,23	

Les paramètres de *E. coli* O157:H7 et de *Shigella* sont identiques car Haas *et al.* (1999) précise que, malgré qu'aucune étude dose-réponse n'ait été conduite concernant *E. coli* O157:H7, le mécanisme pathogène est similaire à celui de *Shigella*. Ce tableau indique également que *Cryptosporidium parvum* et *Giardia lamblia* correspondent au modèle exponentiel avec des coefficients respectifs de 238 et 50,23. Or, ces coefficients sont remis en question (United States Environmental Protection Agency (USEPA) 2003). L'étude se basera sur des données plus récentes pour ces organismes.

Rappel sur les lois :

Loi exponentielle : $P_I(d) = 1 - e^{(-r \cdot d)}$

Loi Beta-Poisson : $P_I(d) = 1 - \left(1 + \frac{d}{N_{50}(2^{1/\alpha} - 1)}\right)^{-\alpha}$

où : P_I : probabilité d'infection ;

d : dose en contaminant ingéré ;

$r = 1 / k$ est la probabilité que l'organisme pathogène survive dans l'hôte et puisse provoquer un foyer d'infection. Plus r est grand, plus l'agent pathogène a de chances de survivre et d'infecter des personnes. r traduit les niveaux d'infectiosité du contaminant ;

N_{50} : dose médiane d'infection ;

α : paramètre spécifique à l'agent pathogène et qui décrit la sensibilité de l'hôte.

La loi Beta-Poisson est dérivée de la loi exponentielle en attribuant à r une distribution Beta, distribution qui prend en compte le fait que la probabilité d'infection liée à l'ingestion d'une bactérie varie entre les individus.

Haas *et al.* (1999) présente une série de courbes dose-réponses pour différents micro-organismes. L'étude de Ward (1986) sur les *rotavirus* a été effectuée sur des humains. Pour chaque dose testée, un certain nombre de volontaires, allant de 3 à 11, étaient suivis médicalement afin de déterminer s'ils étaient infectés ou non. Les doses de virus testées s'échelonnent de 0,009 à 90 000 virus. 59 tests ont été réalisés. La Figure 5.3 présente la

courbe-résultat obtenue, avec les intervalles de confiance à 95%. Un risque de 10% d'infection est attribué à une dose moyenne d'environ 0,3 *Rotavirus*.

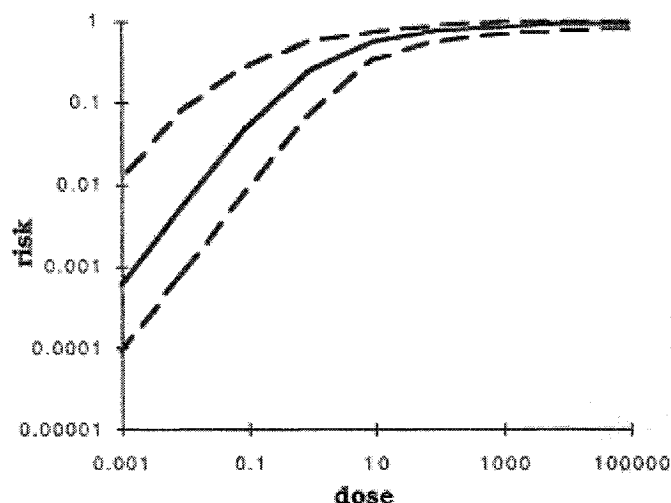


Figure 5.3 : Courbe dose-réponse des *rotavirus* (tiré de Haas *et al.* 1999).

Dupont et Hornick (1972) ont effectué des études de 2 espèces et 3 souches de *Shigella*. 269 tests de différentes doses de ces types d'agents pathogènes ont été réalisés sur des hommes en pleine santé. Suivant les souches et espèces, des courbes doses-réponses, présentées à la la Figure 5.4, ont pu être tracées ainsi qu'une courbe mélangeant ces différentes données. Sur la courbe, en laissant de côté les données concernant la souche 2A## ainsi que ses intervalles de confiance à 95% car trop étendus, il faut noter que le modèle combiné et ses intervalles de confiance à 95% englobent les données des autres souches et espèces, permettant d'affirmer que cette courbe (pooled) est bien représentative du modèle d'infection des *Shigella* et du risque d'infection réel. La Figure 5.4 montre qu'un risque de 10% d'infection est attribué à une dose moyenne d'environ 20 *Shigella*.

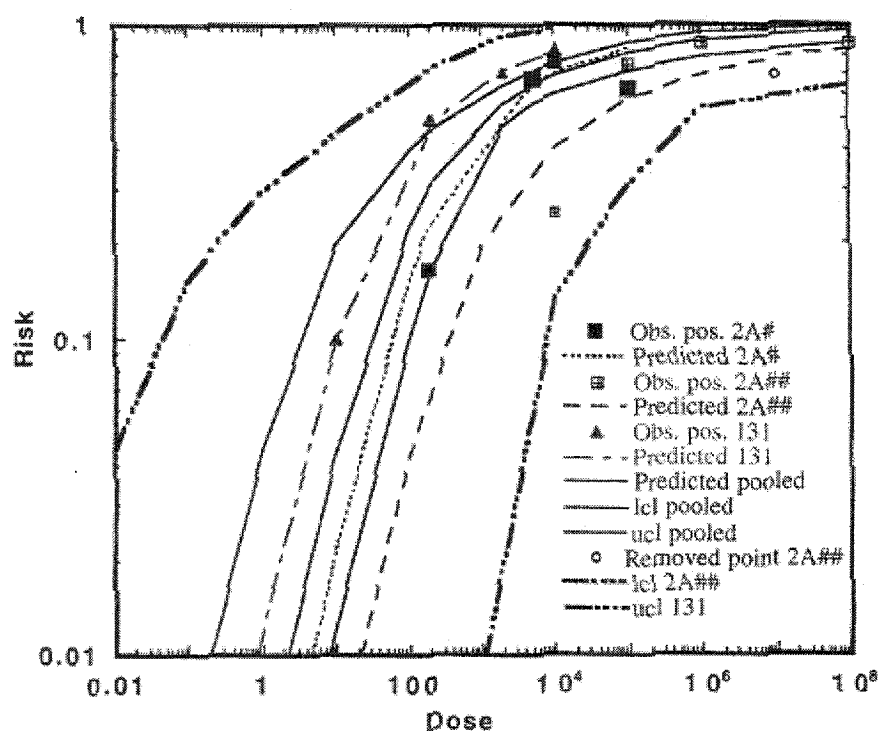


Figure 5.4 : Courbes dose-réponse pour *Shigella* (tiré de Haas *et al.* 1999).

L'étude de Hornick (1971) amène les résultats obtenus avec *V. cholerae* Inaba 569B qui a été testée sur des adultes en pleine santé. Les effets ont été classés en 3 catégories : présence de *V. cholerae* ou d'anti-corps correspondants dans les selles, fréquences de diarrhées avec présences de microorganismes mais dont la sévérité ne nécessite pas de réhydratation, diarrhées sévères nécessitant des réhydratations par intraveineuses. Pour l'obtention de la courbe présentée à la Figure 5.5, ont été considérés comme positifs tous les individus qui présentaient au moins l'un des 3 niveaux de conséquences. Les doses en contaminant testées s'étalaient de 10 à 100 000 000 organismes pour un total de 52 expériences. La Figure 5.5 montre qu'un risque de 10% d'infection est attribué à une dose moyenne d'environ 10 *Vibrio cholerae*.

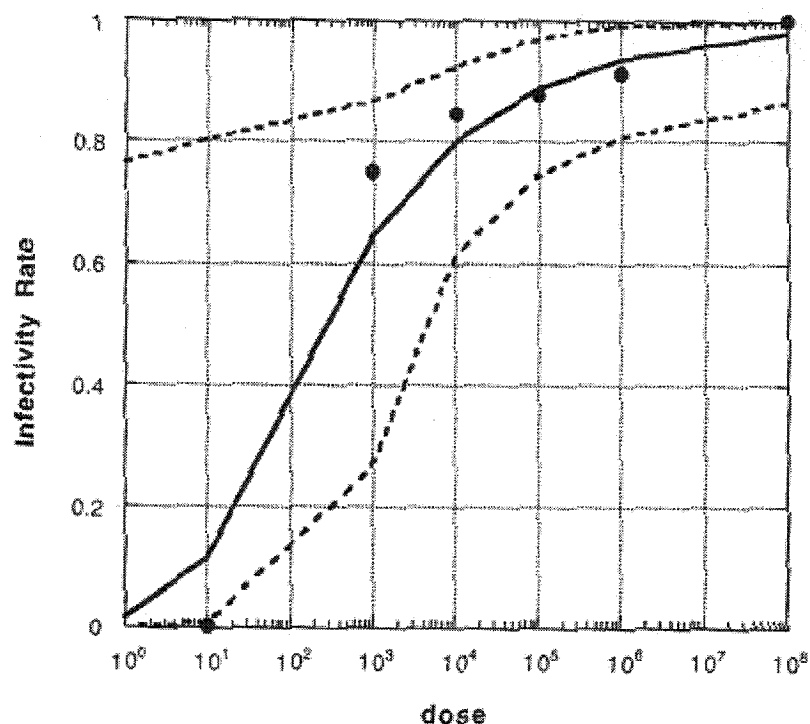


Figure 5.5 : Courbes dose-réponse pour *Vibrio cholerae* (tiré de Haas *et al.* 1999).

Les doses-réponses de *Cryptosporidium parvum* sont en réévaluation. L'infectiosité moyenne ($1/k=0,0042$) donnée par Haas *et al.* (1999) (Tableau 5.2 page 64) serait bien inférieure à la réalité. Un mélange statistique de 3 souches différentes de *Cryptosporidium parvum* (IOWA, UCP et TAMU) a été réalisé et l'infectiosité résultante s'est avérée être de 0,096 avec des infectiosités à 95% de 0,007 et 0,30 (United States Environmental Protection Agency (USEPA) 2003). La courbe obtenue est présentée en Figure 5.6. Les grands écarts entre intervalles de confiance témoignent de la disparité dans les résultats des 3 études prises en compte. Un risque de 20% d'infection est attribué à une dose moyenne d'environ 2,5 *Cryptosporidium parvum*.

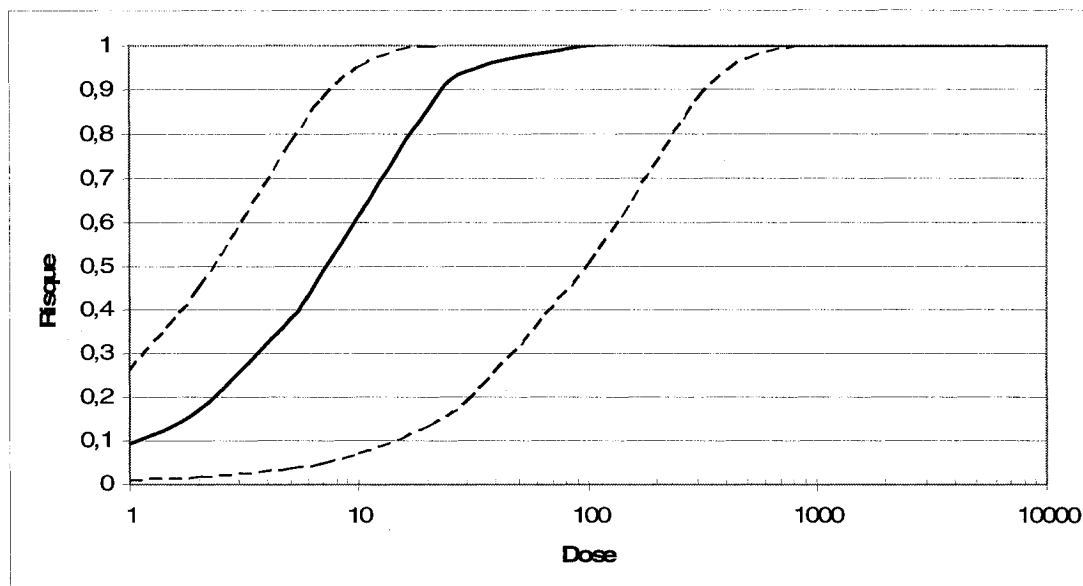


Figure 5.6 : Courbes dose-réponse pour *Cryptosporidium parvum* (tiré de United States Environmental Protection Agency (USEPA) 2003).

Barbeau *et al.* (2000) indique que le coefficient r relatif aux *Giardia* serait de 0,0192 ($1/50,23 = 0,0199$ pour Haas *et al.* (1999)) avec des intervalles à 95% de 0,0087 et 0,029. Ce document étant plus récent, ces résultats ont été retenus et présentés en Figure 5.7. Un risque de 20% d'infection est attribué à une dose d'environ 10 *Giardia*.

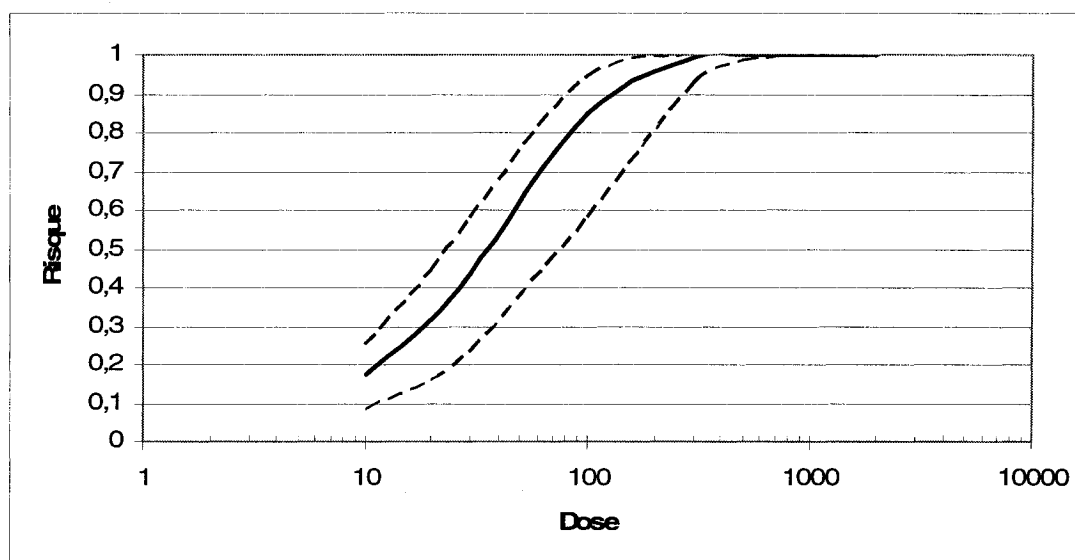


Figure 5.7 : Courbes dose-réponse pour *Giardia* (tiré de Barbeau *et al.* 2000).

Commentaires concernant l'ensemble de ces courbes dose-réponse :

Étant donné le peu d'études concernant l'élaboration de ces courbes doses-réponses, les intervalles de confiance à 95% sont assez étendus. Ces intervalles sont particulièrement importants pour les faibles doses en contaminants ce qui s'explique par les caractéristiques propres à chaque individu, par leurs prédispositions à réagir à différents types de contaminants. Également, il se peut que dans certains cas, comme pour *V. cholerae*, les doses ingérées par les volontaires n'aient pu être mesurées avec des précisions suffisantes (Haas *et al.* 1999). De plus, les études sur lesquelles se basent ces courbes datant quelque fois d'une quarantaine d'années, la rigueur des méthodologies employées peut être remise en question. Il est donc important de se contenter de considérer ces courbes comme des indicateurs approximatifs du risque de maladie encouru lors de l'ingestion des doses indiquées. Néanmoins, ces courbes fournissent un bon ordre de grandeur du risque encouru lors de l'ingestion de fortes doses de contaminants. Le risque est donc plus quantifiable dans ces zones, l'écart séparant les intervalles de confiance étant plus acceptable.

Concernant les patients présents dans l'hôpital, il pourrait être considéré que, étant très certainement plus faibles au niveau immunitaire que des personnes en pleine santé, les courbes supérieures d'intervalles de confiance à 95% sont représentatives du risque de contracter des maladies hydriques. Cependant, l'avis d'experts à ce sujet serait recommandé, mais sachant qu'il y a peu d'informations concernant les courbes dose-réponse pour des personnes en santé, il y en a encore moins pour des personnes déjà malades. Il serait aussi possible de procéder différemment en considérant, par exemple, qu'en moyenne, le risque de contamination de X% de personnes en santé correspond à un risque de contamination de (X+Y)% de patients.

5.2.2.3 Synthèse

Les liens entre la caractérisation du fonctionnement de l'hôpital vis-à-vis de l'absence de son personnel, et celui traitant du degré d'affectation de personnes par rapport à des maladies hydriques ont été obtenus. Il est possible de lier directement le niveau de fonctionnement de l'hôpital H en fonction de l'exposition à des doses en contaminants à l'eau du robinet.

Par exemple, il est possible de définir la dose moyenne de *Shigella* pouvant affecter le personnel de l'hôpital au point d'atteindre un niveau de fonctionnement inacceptable :

- À partir de la Figure 5.1 (page 59), il est possible de quantifier le nombre de personnes absentes au sein du personnel pour que l'hôpital H soit affecté d'une façon inacceptable. Ce nombre de personnes varie entre 9 (pour une absence d'une semaine) et 30 (pour une absence limitée à un jour) sur un total de 150, ce qui représente respectivement 6% et 20% du personnel de l'hôpital.
- Sur la courbe dose-réponse relative à *Shigella* de la Figure 5.4 (page 67), il suffit de repérer les doses en *Shigella* correspondant à des risques de 6% et 20% d'être infecté pour un individu sain. À un risque de 6% d'être infecté correspond une dose moyenne de *Shigella* (courbes pooled) d'environ 15 unités (valeurs des intervalles de confiance à 95% : 1,5 et 60 unités). De même, à un risque de 20% d'être infecté correspond une dose moyenne de *Shigella* d'environ 90 unités (valeurs des intervalles de confiance à 95% : 10 et 120 unités).

La précision d'une telle estimation est limitée en raison des écarts des intervalles de confiance à 95%. Néanmoins, les valeurs de doses de *Shigella* obtenus ici donnent un bon ordre de grandeur. Il faut que les membres du personnel ingèrent entre 1,5 et 120 unités de *Shigella* chacun pour que l'hôpital H atteigne un niveau de fonctionnement intolérable. En faisant l'hypothèse que chaque personne boit en moyenne 500 ml d'eau par jour sur son lieu de travail, il faut que la concentration en *Shigella* aux robinets de l'hôpital atteigne entre 0,3 unités/100 ml et 24 unités/100 ml.

5.3 ÉTUDE DU RÉSEAU D'EAU POTABLE

5.3.1 Identification des sources des problèmes de qualité liés au réseau d'eau potable

Il s'agit maintenant de se tourner vers le réseau d'eau potable approvisionnant l'hôpital H et d'étudier les événements qui pourraient mener à une telle contamination. Sous quelles conditions et comment peut se produire une contamination au sein d'un réseau d'eau potable ?

5.3.1.1 *Les pressions transitoires ou négatives*

En général, le réseau d'eau potable est sous pression positive. Les fuites qu'il peut comporter ne posent alors pas de problèmes concernant la qualité de l'eau étant donné que cette dernière sort par les fuites, empêchant toutes intrusions de matériaux ou eaux sales dans le réseau. Cependant, sous certaines conditions, le système peut subir des baisses de pression voire des pressions négatives. Ces phénomènes sont dus à des changements soudains de la vitesse d'écoulement ou des arrêts d'approvisionnement. Les changements de vitesses sont liés à différents facteurs : fermeture rapide de valve, bris de conduite, arrêts des pompes, changement brutal de la demande en eau, ouverture de bornes incendies, opérations de nettoyages, rinçage des réservoirs et conduites, etc. L'amplitude du changement de pression varie selon différents facteurs tels que le type de matériaux des conduites, leurs caractéristiques, la vitesse d'écoulement. À cela s'ajoutent les caractéristiques propres au réseau lui-même : conduites en cul-de-sac, manque de réservoir de stockage élevés, topographie, valves, fréquence des défaillances des stations de pompage, etc.

Par exemple, lorsqu'une vanne est fermée soudainement, la vitesse d'écoulement devient subitement nulle et l'énergie cinétique est convertie en pression, ou plus exactement en vague de pression transitoire (LeChevallier *et al.* 2003). De part et d'autre

de la vanne, cette vague se répand, parcourant le réseau jusqu'à ce qu'elle perde son énergie en étant stoppée dans les réservoirs ou des valves de surpression (valves à air). Si la zone dans laquelle la vague se répand est close, elle est réfléchiée jusqu'à épuisement par friction. Étant donné le caractère incompressible de l'eau et le milieu hermétique dans lequel elle prend naissance, la vague de pression comporte une première partie de forte pression positive suivie immédiatement d'une partie de pression négative (suction). C'est par cet effet de suction que peut se produire une intrusion d'élément extérieur au sein du réseau d'eau potable.

Pour que des agents pathogènes s'introduisent au sein du réseau, il faut que les phénomènes de pressions transitoires soient relativement fréquents, avec des amplitudes suffisantes. Dans son étude, Kirmeyer *et al.* (2001) a simulé des situations de pannes des stations de pompes sur les réseaux de distribution de 3 municipalités américaines. Les résultats suggèrent que 13% à 28% des nœuds (points de jonction entre conduites) ont alors des pressions faibles ou négatives sur pendant des durées allant de 20 à 120 secondes. Lors de simulations de ruptures de conduites et de demandes incendies, 31% des nœuds présentaient de telles pressions. Il est précisé que les 3 systèmes étudiés étaient gérés convenablement et donc que des systèmes moins bien entretenus devaient connaître des épisodes de pressions faibles ou négatives de manière plus fréquentes et plus sévères, ce qui représente un plus grand potentiel d'intrusion d'agents pathogènes.

Il ne faut pas obligatoirement de pressions négatives pour qu'il y ait intrusion. Le suivi de la pression à des robinets de consommateur a montré de larges fluctuations avec des pressions aussi basses que 4,3 psi soit 29,6 kPa (Kirmeyer *et al.* 2001), fluctuations dues à des circonstances particulières de consommations. Lors d'un tel événement, la présence d'une nappe phréatique dont le niveau supérieur serait de 10 pieds au-dessus la conduite d'eau potable pourrait causer suffisamment de pression externe pour permettre une intrusion dans cette section du réseau.

Les épisodes de pressions faibles ou négatives sur les réseaux d'eau potable sont donc relativement courants et leurs durées (pouvant aller de quelques secondes à 1 ou 2 minutes) permettent l'intrusion de quantités relativement importantes d'eau dépendamment de la grandeur de la fissure sur la conduite. Mais y a-t-il suffisamment de fissures ou points d'entrées dans un réseau d'eau potable ?

5.3.1.2 Les points d'entrée d'un réseau d'eau potable

Kirmeyer *et al.* (2001) propose un classement des risques d'intrusions au niveau des entrées probables des agents pathogènes basé sur 4 critères : la sévérité des maladies, la probabilité de propagation des maladies hydriques, le volume contaminé et la fréquence des intrusions. Le Tableau 5.3 donne les conclusions des experts consultés.

Tableau 5.3 : Points d'entrée de contaminants et niveaux de risque (adapté de Kirmeyer *et al.* 2001).

Points d'entrée ou moyens d'entrée	Niveaux de risque
Percée au niveau de la station de traitement	Élevé
Contamination par pressions transitoires	
Jonctions fautives	
Rupture/réparation de conduites	
Réservoirs à ciel ouvert	Modéré
Installations de nouvelles conduites	Faible
Réservoirs fermés	
Croissance biologique, re-suspension	
Contamination volontaire	

Parmi les points d'entrées probables de pathogènes, de risque élevé, trois sur quatre concernent le réseau d'eau potable :

- Installations et réparations des conduites : lors de ces opérations, les conduites peuvent être contaminées par différents agents pathogènes lors de leurs stockages à proximité du chantier en attente d'être posées. Lors de leurs poses, de l'eau contaminée peut très facilement se retrouver dans le réseau, malgré avoir fermé toutes les vannes autour de la zone de travaux. Le sol humide à proximité d'une réparation d'une fuite est une source potentielle de contamination bactérienne.
- Jonctions ou connexions fautives : les connexions fautives peuvent se définir comme une connexion entre un réseau d'eau potable et un autre réseau comme les égouts ou les conduites de réceptions des pluies. Les contaminations sont alors très probables en absence d'un programme de prévention des refoulements.
- Contamination par pressions transitoires : ce type de contamination a déjà été abordé précédemment.

Les deux premières voies d'entrées sont évidentes et peuvent faire l'objet de mises en place de mesures préventives comme la désinfection, le rinçage ou l'installation obligatoire de dispositifs anti-refoulements. Le contrôle des pressions transitoires élevées fait déjà partie de critères de conception courants. La minimisation des pressions négatives de très courte durée ne l'est pas. L'importance d'une intrusion due à une pression transitoire au sein du réseau dépend de différents facteurs : nombre et taille des orifices (fissures), type et quantité de contaminant aspiré, fréquence, durée, amplitude de la vague de pression, type de population exposée.

L'étude menée par Kirmeyer *et al.* (2001) montre que 77% des 26 municipalités étudiées étaient dotées de programmes de détections de fuites et que les pertes en eau s'évaluaient de 10 à 32% de l'eau potable produite. Ainsi, il est raisonnable de penser que tous les réseaux d'eau potable comportent des fuites.

Les intrusions n'ont pas seulement lieu au niveau des fuites des conduites. Sous certaines conditions de pressions, les joints entre conduites peuvent présenter des fuites. De même, les chambres de compteurs ou de valves inondées peuvent aussi constituer un

point d'entrée de contaminants potentiels : 20% des réseaux étudiés par Kirmeyer *et al.* (2001) présentent 25 à 75% de leurs chambres inondées.

5.3.1.3 *Présence d'agents contaminants à proximité des conduites d'eau potable*

Pour constituer une menace pour la santé publique, il faut qu'il y ait présence d'agents pathogènes dans l'eau qui s'introduit dans le réseau. Tout type de contaminant peut s'introduire le réseau lors d'une pression transitoire. Il peut s'agir de contaminants chimiques comme les pesticides, les dérivés du pétrole, les fertilisants, les solvants, les détergents, les produits pharmaceutiques et encore bien d'autres composés.

Karim *et al.* (2003) a examiné les sols et l'eau immédiatement adjacents aux conduites d'eau dans 8 municipalités américaines. Parmi les 66 échantillons collectés, près de la moitié contenaient des coliformes totaux et fécaux indiquant la présence d'une contamination fécale. Des virus ont également été détectés. Tout résultat confondu, 56% des échantillons renfermaient des virus, soit dans l'eau, soit dans le sol. L'étude de ces virus a montré qu'il s'agissait principalement d'entérovirus (*poliovirus*, *coxsackievirus*, *echovirus* et le virus de l'hépatite A). Le fait d'avoir trouvé le virus de l'hépatite A est clairement la preuve d'une contamination fécale humaine immédiatement adjacente à une conduite d'eau potable (LeChevallier *et al.* 2003). Cette étude a également montré que les nombres d'organismes recueillis dans les échantillons peuvent être conséquents. Les coliformes totaux pouvaient atteindre 10^4 bactéries pour 100 grammes de sol. Cela s'explique simplement par la proximité de conduites d'eaux usées. En présence de nappe phréatique, des contaminants peuvent être retrouvés à plusieurs mètres des conduites d'égouts, si celles-ci n'ont pas un niveau d'étanchéité acceptable.

Kirmeyer *et al.* (2001) a également mené deux études montrant que 42,8% et 50% des échantillons d'eau et de sols prélevés à proximité de conduites d'eau potable contenaient des coliformes fécaux à hauteur de 2 à $1,6 \times 10^3$ unités/mL pour les échantillons d'eau et de 2 à $1,6 \times 10^4$ unités/100g pour les échantillons de sol. Besner *et al* (2006) n'a

cependant trouvé d'*E. coli* que dans moins de 10% de ses échantillons d'eau ou de sol. Néanmoins, les agents pathogènes des maladies hydriques sont bien présents dans l'environnement immédiatement adjacent aux conduites, et peuvent donc contaminer sans difficultés le réseau.

5.3.1.4 *Un risque pour la santé publique*

Pour l'instant, il est difficile de préciser si les intrusions au sein d'un réseau d'eau potable représentent un risque substantiel pour la santé publique. Les facteurs déterminants l'importance de ces contaminations restent mal définis : l'ampleur et la durée des pressions négatives, les volumes relativement faibles d'intrusions comparés aux volumes présents dans les conduites, la nature des débits (effets de dispersion), la proximité des conduites des sources de contaminations microbiennes (égouts), les niveaux de saturations des sols (qui jouent un rôle important dans le transport des microbes), etc. Cependant, l'étude épidémiologique menée par Payment *et al.* (1991 et 1997) suggère que les réseaux de distribution d'eau potable sont au moins partiellement responsables d'augmentations de niveaux de maladies gastro-intestinales. Les populations consommant l'eau du robinet présenteraient plus de gastro-entérites. De plus, le risque de contraction de gastro-entérites est plus élevé dans les zones éloignées des stations de traitement. Parallèlement à ces études, Kirmeyer (2001) a testé le réseau de distribution en question à travers son modèle de pressions transitoires. Le système est sensible aux pressions négatives, avec plus de 90% de nœuds présentant de telles pressions sous certains scénarios (arrêt des pompes par coupure de courant notamment). Ce réseau, victime de nombreux bris en automne et hiver, présentait également de faibles concentrations en chlore résiduel, surtout en bout de réseau. Pourtant, le système de traitement des eaux respectait pleinement les règles de l'art. Ainsi, les intrusions au sein d'un réseau de distribution d'eau potable peuvent avoir un impact sur la santé publique.

5.3.1.5 Le désinfectant résiduel, un facteur limitant

Le chlore résiduel présent dans le réseau peut jouer un rôle important dans l'inactivation de certains agents pathogènes. La Figure 5.8 donne des ordres de grandeur des valeurs de Ct (Concentration du désinfectant) x (temps de contact) pour différents contaminants afin d'obtenir 99% d'inactivation.

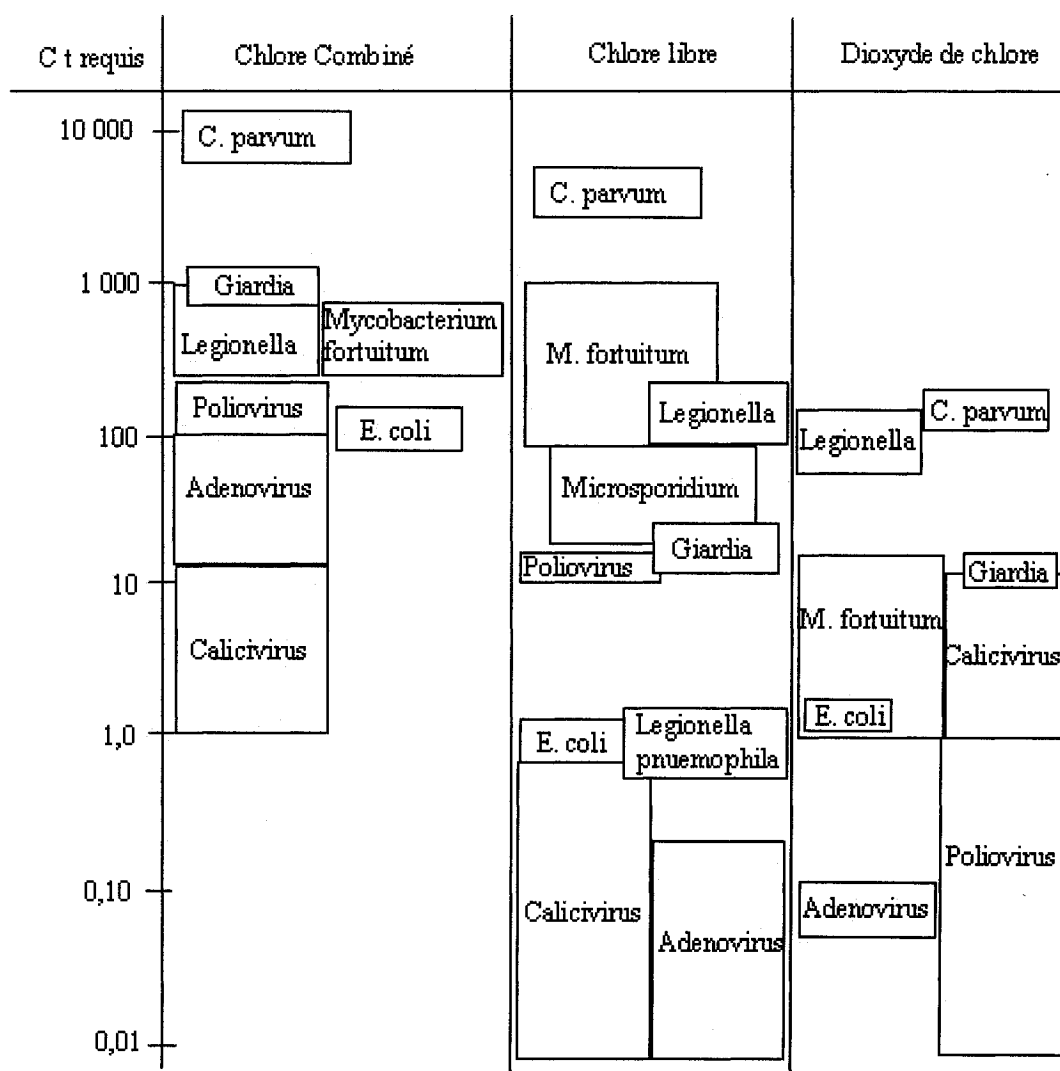


Figure 5.8 : Ct requis pour 99% d'inactivation suivant différents désinfectants (adapté de Crittenden *et al.* 2005).

Certains contaminants comme les *Adenovirus* seront inactivés rapidement, notamment par le chlore libre (Ct inférieurs à 1,0 mg.min/L). Les contaminants comme *Cryptosporidium*, en revanche, nécessitent des Ct plus élevés (de 3000 à 7000 mg.min/L pour le chlore libre) qui ne seront pas applicables dans un réseau de distribution. La consommation d'eau qui suivra l'apparition d'un bris sur le réseau ou d'une pression transitoire, sera associée à un risque plus élevé de contracter des maladies hydriques. L'exposition à une contamination est directement liée à la proximité entre le point de contamination et celui de consommation. Des temps de contacts courts avec le chlore résiduel ne permettent pas une inactivation suffisante de certains agents pathogènes.

Dans la plupart des cas, les agents contaminants seront dilués dans de grandes quantités d'eau comparativement aux quantités d'eau contaminée qui pénétreront le réseau. Néanmoins, des agents pathogènes peuvent très certainement se retrouver en quantité suffisante et être suffisamment virulents pour infecter des consommateurs. Cette menace est d'autant plus réelle que pour certains contaminants, comme les *rotavirus*, seule l'ingestion de quelques organismes suffit à infecter un individu.

Peu d'études ont été réalisées concernant l'efficacité du chlore résiduel dans les réseaux d'eau potable. Propato *et al.* (2004) souligne qu'il est difficile de connaître les temps de séjours des eaux au fil de la journée ainsi que les variations des concentrations en désinfectant au sein du réseau. C et t dépendent du moment de la journée et de la localisation des conduites. Un résiduel en désinfectant est supposé contrôler la croissance des biofilms dans les conduites, la recroissance de microorganismes et inactiver les agents pathogènes qui pourraient s'introduire dans le réseau d'eau potable. Mais qu'en est-il réellement ? Y a-t-il une concentration suffisante en désinfectant et des temps de contacts suffisants ? Cela dépend de nombreux facteurs : le design du système de distribution, les opérations réalisées dessus, la localisation, le temps et la quantité de l'intrusion, les cinétiques du désinfectant en réseau, etc. Pour remédier à ce manque d'étude, Propato *et al.* (2004) a modélisé une intrusion de *Giardia* dans un réseau

simple, en utilisant plusieurs hypothèses. Ses conclusions, très mesurées étant donné les hypothèses, sont les suivantes :

- un résiduel de chlore libre est plus efficace que le chlore combiné pour diminuer la vulnérabilité du réseau ;
- même avec une concentration en chlore résiduel élevée, les temps de contacts ne sont pas forcément suffisants pour inactiver les pathogènes ;
- un désinfectant résiduel permet une réduction significative de la vulnérabilité du réseau en comparaison à une situation sans désinfectant.

Récemment, Baribeau *et al.* (2005) a modélisé l'intrusion d'agents pathogènes moins résistants au chlore (*E.coli*). Conservant la plupart des hypothèses de Propato *et al.* (2004), Baribeau *et al.* (2005) conclut qu'une dose de 0,5 mg/L de chlore libre dans un réseau permet de contrôler l'ensemble des contaminants dont la résistance au chlore est qualifiée de moyenne (équivalente à celle de *E.coli*) mais qu'elle ne constitue pas une barrière pour les contaminants plus résistants tel que *Giardia*.

Ces deux études ont émis des doutes quant à la validité des calculs d'inactivation avec les Ct classiques. Des organismes pourraient survivre malgré des Ct conséquents, surtout lorsque des C plutôt faibles sont associés à des t très longs. Les recherches bibliographiques à ce sujet sont restées infructueuses (Baribeau *et al.* 2005). Ainsi, le chlore résiduel d'un réseau constitue bien une barrière face à l'intrusion d'agents pathogènes, mais cette barrière a des limites.

5.3.2 Les facteurs externes

Concernant les problèmes de contamination, différents facteurs externes au réseau d'eau potable lui-même sont à considérer.

5.3.2.1 Les égouts

Les contaminants les plus probables sont d'origine microbiologique car ils se retrouvent en grande quantité dans les égouts, source potentielle de contamination à impact sanitaire évident, souvent proche des conduites d'eau potable. D'où la question : que retrouve-t-on dans nos égouts ? Le Tableau 5.4 montre les gammes de concentrations de micro-organismes indicateurs et pathogènes trouvés dans les eaux usées.

Tableau 5.4 : Concentrations moyennes des organismes dans les égouts (adapté de Tchobanoglous *et al.* (2003)).

Organismes	Concentration dans les eaux usées, unités/100 mL
Bactéries:	
Bactéroïdes	10^7 - 10^{10}
Coliformes totaux	10^7 - 10^9
Coliformes fécaux	10^6 - 10^8
<i>Clostridium perfringens</i>	10^3 - 10^5
Enterococci	10^4 - 10^5
Streptocoques fécaux	10^4 - 10^7
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	10^3 - 10^6
<i>Shigella</i>	10^0 - 10^3
<i>Salmonella</i>	10^2 - 10^4
Protozoaires:	
Oocystes de <i>Cryptosporidium parvum</i>	10^1 - 10^3
Kystes d' <i>Entamoeba histolytica</i>	10^{-1} - 10^1
Kystes de <i>Giardia Lamblia</i>	10^3 - 10^4
Helminthes:	
Ova	10^1 - 10^3
<i>Ascaris lumbricoïdes</i>	10^{-2} - 10^0
Virus:	
Virus entériques	10^3 - 10^4
Coliphages	10^3 - 10^4

Le Tableau 5.5 donne des ordres de grandeurs sur les durées de survie d'agents pathogènes à des températures de 20-30°C.

Tableau 5.5 : Durées de survie des organismes (adapté de Tchobanoglous *et al.* (2003)).

Pathogènes	Temps de survie, jours	
	Eau douce ou usée	Sol
Bactéries:		
Coliformes fécaux	<60 mais généralement <30	<120 mais généralement <50
<i>Salmonella</i> spp.	<60 mais généralement <30	<120 mais généralement <50
<i>Shigella</i>	<30 mais généralement <10	<120 mais généralement <50
<i>Vibrio cholerae</i>	<30 mais généralement <10	<120 mais généralement <50
Protozoaires:		
Kystes d' <i>E. Histolytica</i>	<30 mais généralement <15	<20 mais généralement <10
Helminthes:		
Oufs d' <i>A. Lumbricoïdes</i>	Plusieurs mois	< Plusieurs mois
Virus:		
Enterovirus	<120 mais généralement <50	<100 mais généralement <20

De nombreux types d'organismes sont présents en grand nombre (jusqu'à 10^8 coliformes fécaux par 100 mL) dans les eaux usées et peuvent y survivre pendant de longues durées (plusieurs semaines).

Le risque de contamination du sol et des eaux autour des conduites d'eau potable dépend de l'étanchéité des conduites d'égouts. Leur état est un critère important, tant au niveau structural (résistance au passage de véhicules et au poids du remblais et chaussée), hydraulique (dimensionnement adéquat qui évite les débordements) et au niveau de l'étanchéité (l'égout est un moyen de convoyer des eaux usées et non un diffuseur de ces eaux dans les sols). Un autre critère est la distance entre les conduites d'égouts et celles d'eau potable. Théoriquement, les conduites d'eau potable sont situées au dessus de celles d'égouts, mais dans certaines configurations (passage d'un autre réseau souterrain,

etc.), les deux conduites peuvent être voisines. Un autre facteur pouvant être retenu est la présence dans certains secteurs de réseaux d'eaux usées combinés ou séparatifs. En cas d'averses majeures, le réseau combiné peut déborder et refouler ainsi les eaux usées en surface. Il est possible également de prendre en compte des facteurs tels que diamètres, âges de pose, matériaux, taux de bris, etc.

5.3.2.2 *La nappe phréatique et la topographie*

Un autre aspect qui favorise l'intrusion d'éléments au sein du réseau est la présence d'une nappe phréatique. Les conduites situées sous la surface de la nappe phréatique seront sujettes à la pression de cette eau externe (qui dépend de la hauteur statique d'eau présente entre la conduite et la surface de la nappe). Cette eau externe peut pénétrer le réseau lorsque une pression négative ou simplement plus faible que celle imposée par la nappe apparaîtra. Généralement, chaque réseau possède des conduites sous la surface d'une nappe phréatique pour au moins une partie de l'année. De plus, la présence d'une nappe phréatique autour des conduites d'égouts et d'eau potable est un facteur non négligeable car elle facilite la migration des contaminants dans les sols.

Il est possible de tenir compte de la topographie comme critère. Les zones basses d'une municipalité, zones en « cuvette », sont plus propices à voir des accumulations d'eaux usées dans les réseaux d'égouts gravitaires augmentant ainsi le risque de contamination de l'eau potable. Ceci dit, les zones basses du réseau d'eau potable étant sujettes à des pressions plus élevées (si le réseau d'eau potable fonctionne lui aussi de façon gravitaire), il devrait être plus difficile qu'ailleurs d'observer des chutes de pressions permettant l'intrusion de contaminants. Néanmoins, un risque existe.

5.3.2.3 *La contamination non volontaire*

Dans certain cas, des agissements humains non volontaires ou des accidents particuliers peuvent conduire à des contaminations. Des usines utilisant de grandes quantités d'eau dont les conduites de services ne sont pas pourvues de valves anti-refoulement peuvent

contaminer le réseau lors d'une chute de pression. Des contaminations ponctuelles peuvent avoir lieu près des cuves d'une station essence. Un phénomène de siphonage peut se produire si le tuyau de remplissage d'une piscine a sa tête sous le niveau de l'eau, etc. Il peut donc être intéressant pour la suite de repérer sur le terrain ces sources potentielles de contaminations.

Ainsi, les facteurs ne manquent pas pour caractériser avec précision, suivant les données réseau ou externes, la vulnérabilité de la zone d'étude. Tous n'ont pas été cités mais tous ne sont pas forcément à considérer. Suivant les configurations et les disponibilités des données, seuls quelques uns peuvent être retenus. Le but final de cette démarche d'analyse de risque étant de hiérarchiser la réhabilitation de conduites d'eau potable, il est inutile de vouloir rechercher un niveau de précision élevé. Suivant les critères retenus, des zonages par secteurs peuvent être très satisfaisants. Ce choix de critères devra être réalisé en fonction du jugement des experts. Également, si un critère est jugé important mais n'est pas disponible, alors il faudra engager des recherches pour obtenir des informations à son sujet. L'idée n'est pas de se servir uniquement des données existantes si des informations sont indispensables à l'étude. La prochaine partie va présenter les critères obtenus pour l'hôpital H et les conclusions quant à la hiérarchisation des conduites à réhabiliter.

5.4 SYNTHÈSE

5.4.1 Critères obtenus

5.4.1.1 Précision sur l'approche par conséquences

Jusqu'à présent, le niveau de fonctionnement intolérable de l'hôpital H a été relié à des concentrations critiques en contaminants à ses robinets. L'idéal, vis-à-vis de l'approche par conséquences, serait de trouver, suivant (i) les espèces de contaminants considérées,

(ii) leurs résistances au chlore et (iii) les taux de dilutions liés à leurs parcours dans le réseau de conduites, les endroits du réseau et les quantités en contaminants à introduire pouvant mener aux concentrations critiques aux robinets de l'hôpital H. Une fois cette étape réalisée, il faudrait évaluer la vulnérabilité du réseau à de telles contaminations. En partant d'un niveau de fonctionnement de l'hôpital, il serait possible de définir les points critiques du réseau d'eau potable pour lesquels une contamination engendrerait un niveau d'affectation inacceptable pour l'hôpital.

Cependant, les avancées actuelles sur les connaissances permettant d'appliquer l'approche par conséquences comme présentée ci-dessus sont insuffisantes. La détermination des points de contaminations et des quantités en contaminants à injecter sur le réseau en remontant les écoulements à partir d'un niveau de contamination précis à un nœud du réseau est difficile à effectuer. Les modèles hydrauliques développés sur informatique ont été développés selon un modèle causal. Une contamination est simulée à un point du réseau, puis suivie pour connaître où elle se rendra et avec quelle dilution. Le lien entre un niveau de contamination critique en un point (l'hôpital H) et la quantité de contaminant et la localisation en amont sur le réseau d'eau de l'origine de cette contamination reste difficile à faire.

Pourquoi alors vouloir utiliser l'approche par conséquences ? Elle permet d'abord de cibler les niveaux entraînant des conséquences non souhaitées pour le sujet d'étude. Les bornes des niveaux critiques de contamination sont connues et caractérisées. L'approche causale du problème, elle, n'a pas, proprement dit, d'objectif fixé. Des simulations d'intrusions sont réalisées puis les conséquences de ces simulations sont répertoriées. Cependant le nombre de situations potentielles d'intrusions sur réseau est infini.

Il faudra néanmoins se résoudre à procéder à l'inverse de l'approche par conséquences pour des raisons techniques. Pour trouver les points du réseau où des contaminations auraient le plus d'effets sur l'hôpital H, il faudra simuler des contaminations sur

différents points en amont du réseau d'eau qui le dessert, et étudier les quantités et la dilution des contaminants qui parviennent effectivement à l'hôpital H. Cela peut sembler être un nombre important de simulations, mais un cadre précis ayant été défini préalablement (un point particulier est étudié (l'hôpital H), seul le réseau de conduites qui le dessert en eau potable va faire l'objet de ces simulations et le niveau critique en contaminants à atteindre est déjà défini), ce nombre sera bien moins élevé comparativement à celui qui aurait été nécessaire en appliquant un modèle causal.

La modélisation de contamination sur des points en amont du réseau vis-à-vis de l'hôpital H peut montrer qu'il y a peu de chances pour qu'une contamination atteigne de façon significative les robinets de l'hôpital (c'est-à-dire suffisamment d'agents pathogènes pour rendre malade du personnel ou des patients). Néanmoins, en répétant la même simulation de contamination pour différents points du réseau, un classement de la criticité des points d'intrusions peut être obtenu. Aux vues des hypothèses de modélisations de contaminations, les résultats obtenus ne seront à considérer que pour leurs ordres de grandeur. Par contre, le classement de la criticité des conduites face à des intrusions pouvant contaminer l'hôpital H, devrait quant à lui, demeurer valable.

5.4.1.2 Données sur le réseau d'eau potable

5.4.1.2.1 Le réseau d'eau potable autour de l'hôpital H

- Localisation de l'hôpital H :

Différentes informations ont pu être obtenues auprès de la ville de Montréal concernant la construction du réseau d'eau potable dans le secteur de l'hôpital H. La Figure 5.9 rassemble les données concernant la localisation des conduites, leurs diamètres, ainsi que leurs années de mise en place. Cette figure n'est qu'une représentation schématique du réseau de conduites, sans échelle particulière. La zone figurée ici s'étend sur environ 1250 m de long pour 240 m de large soit 30 hectares, et comptabilise approximativement 5000 m de conduites, tous diamètres confondus. Ces diamètres vont de 6 pouces à 34 pouces (152,4 à 863,6 mm), avec une majorité de 8 et 12 pouces (203,2 et 304,8 mm).

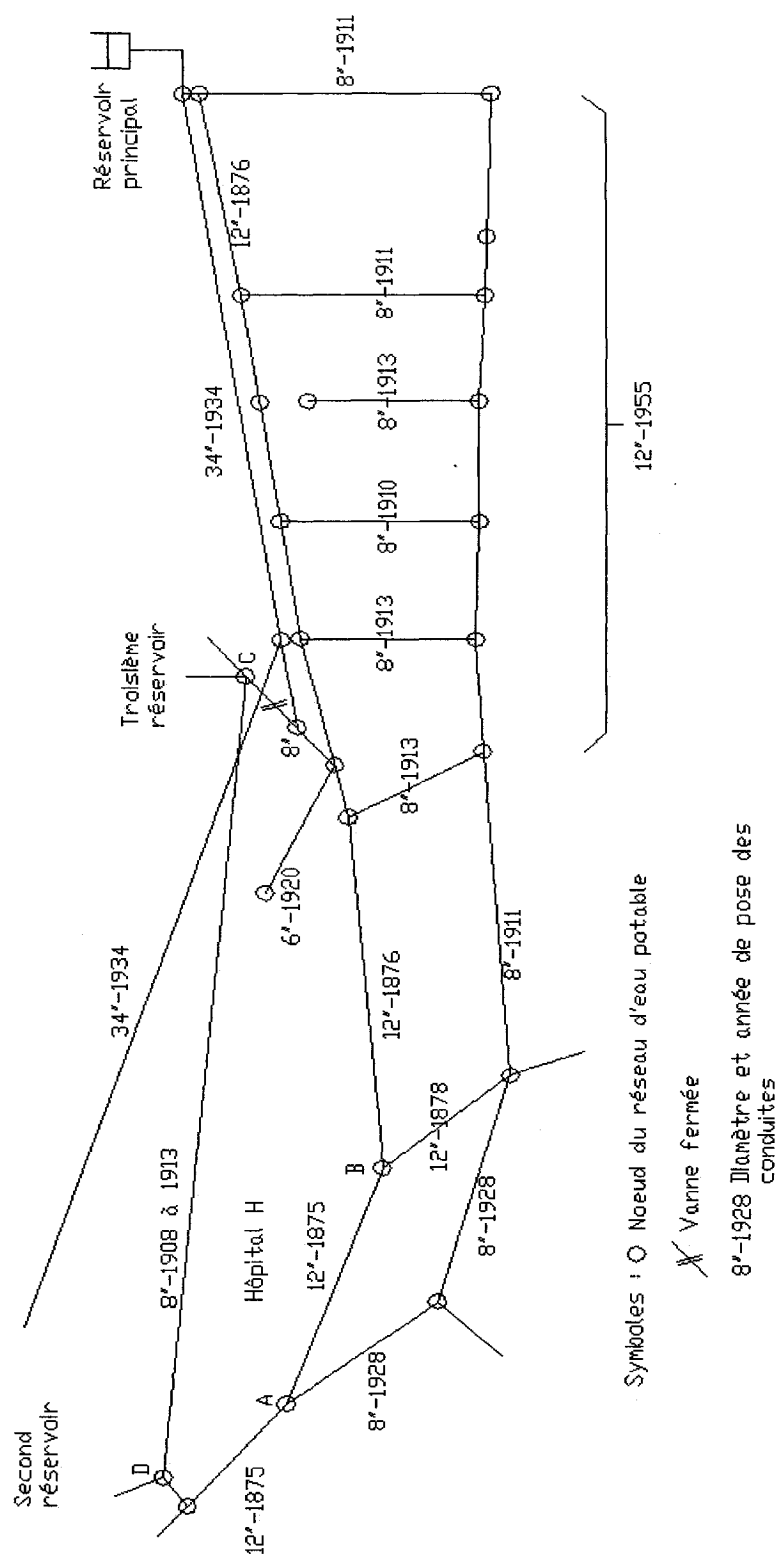


Figure 5.9 : Schéma du réseau d'alimentation en eau potable de l'hôpital H

Sur le réseau, les nœuds qui caractérisent les entrées de services de l'hôpital H sont notés A, B, C et D. Sur le terrain, les entrées de services de l'hôpital H sont situées entre ces nœuds, et pour des raisons de modélisation (voir la prochaine section sur EPANET), ces nœuds ont été retenus comme entrées de services.

Comme indiqué sur la Figure 5.9, trois réservoirs ont une influence sur la zone desservie. Comme va le montrer la simulation informatique, un réservoir, dit réservoir principal, alimente l'hôpital à ses nœuds A et B en régime permanent. Les réservoirs dits « second réservoir » et « troisième réservoir » alimentent eux, les nœuds D et C. Le second réservoir, plus élevé que le principal, est lié à ce dernier par les conduites de 34 pouces (863,6 mm) qui assurent principalement son remplissage. L'étude va se contenter d'étudier le réseau entre le réservoir principal et les nœuds A et B de l'hôpital H.

- Âge des conduites :

Concernant les années de pose des conduites, les données sont plutôt surprenantes avec près de 1300 m de conduites dont l'âge dépasse les 130 ans, 1850 m de conduites âgées d'environ 95 ans, 1250 m âgées d'environ 75 ans et enfin 600 m âgées de 50 ans. Les conduites de 34 pouces sont en béton armé et ont été équipées d'anodes pour lutter contre la corrosion. Pour le reste des conduites, aucuns travaux n'ont été entrepris excepté la réhabilitation de certaines chambres de vannes et bornes fontaines dans les années 1950 et 1990. Il est donc possible d'établir un premier classement des conduites en fonction de leur classe d'âge de pose : celles de 130 ans et plus, celles de 95 ans, celles de 75 ans et enfin celles de 50 ans.

Vis-à-vis des matériaux des conduites, excepté les conduites de 34 pouces (863,6 mm) en béton armé, les plans indiquent que toutes les autres conduites du secteur sont en fonte ductile ou grise. Comme les années de pose des conduites précèdent 1955, il peut être considéré que toutes ces conduites sont en fonte grise. La ville de Montréal affirme avoir utilisé la fonte grise jusqu'en 1963. Ainsi, le critère matériau des conduites

n'apporte pas ici une possibilité de différencier véritablement les conduites. Par contre, il peut être intéressant de connaître la durée de vie utile de la fonte grise. L'American Water Works Association (AWWA 2001) considère que les plus vieilles conduites en fonte grise datant de la fin du XIX^e siècle ont une durée de vie utile moyenne d'environ 120 ans. En réalité, ces conduites peuvent avoir des durées de vies allant de 90 à 150 ans, mais en moyenne, elles doivent être remplacées au bout de 120 ans passés sous terre. Les mêmes conduites posées durant les années 1920 ont une durée de vie utile de seulement 100 ans, les procédés de fabrications ayant été modifiés. Enfin, les conduites posées après la seconde guerre mondiale auraient une durée de vie utile moyenne revue à 75 ans, toujours en raison de modifications des techniques de fabrications.

L'American Water Works Association (AWWA 2002) indique qu'avant 1920, les conduites en fonte grise avaient une épaisseur de paroi surdimensionnée par rapport aux pressions internes et charges extérieures auxquelles elles étaient contraintes. Cela est dû aux inconstances des épaisseurs de parois lors de leurs fabrications. Les joints entre conduites seraient réalisés à base de plomb. Or il n'est plus à démontrer que le plomb dans l'eau est un vrai problème de santé publique. Durant les années 1920, un procédé de centrifugation a permis de réduire l'épaisseur des conduites et de les renforcer structuralement. Néanmoins, le temps a prouvé que ces conduites étaient moins résistantes à la corrosion que leurs ancêtres. Durant les années 1950, le joint à garniture est apparu, permettant de combler les faiblesses des joints rigides. Enfin, la fonte ductile a été introduite durant les années 1960.

Ainsi, les conduites de la zone ayant 130 ans ont déjà dépassé leur durée de vie utile. Celles posées dans les années 1910 font sans doute partie des conduites en fonte grise première génération (120 ans) et n'ont donc possiblement pas encore atteint leur fin de vie utile. Les conduites posées autour des années 1930 auraient une durée de vie utile de 100 ans et elles aussi n'ont pas encore atteint leur fin de vie. Enfin, les conduites de 1955 n'ont pas non plus atteint leur fin de vie (75 ans). De plus, il se peut que ce soit les

seules conduites de la zone qui ne soient pas munies de joints à base de plomb, le joint à garniture ayant fait son apparition dans les années 1950.

Concernant le réseau d'eau potable, d'autres informations techniques auraient pu être prises en compte s'il avait été possible d'y avoir accès : taux de bris des conduites, niveau de délabrement, profondeurs d'enfouissement, etc.

5.4.1.2.2 Modélisation EPANET

Afin d'étudier les potentiels de contaminations sur l'hôpital H de différents points d'intrusion du réseau d'eau potable, une modélisation du réseau d'eau potable en amont de cet établissement jusqu'au réservoir qui le dessert est nécessaire. La zone hydraulique autour de l'hôpital H ayant déjà été modélisée à l'aide du logiciel EPANET lors d'études précédentes (Besner, 1999), il a été choisi d'utiliser ces données.

-EPANET :

EPANET est un programme développé par l'United States Environmental Protection Agency (USEPA) permettant de réaliser différentes modélisations hydrauliques et de qualité de l'eau de réseaux de conduites sur de larges périodes de simulations (Rossman 2000). Le programme calcule la solution hydraulique pour un réseau de distribution, puis utilise les données de débits et de temps pour étudier différents paramètres de qualité (âge de l'eau, concentrations en chlore résiduel, simulation de contaminations).

Le réseau de distribution est donc modélisé selon différents éléments : des réservoirs, des conduites, des nœuds ou jonctions entre conduites, vannes, etc. La demande moyenne en eau relative à chaque bâtiment de la zone est reportée aux extrémités (nœuds) de chaque conduite. Les demandes en eau de l'hôpital H ont été reportées aux nœuds A, B, C et D. Pour se rapprocher de la réalité, les demandes moyennes de chaque nœud se sont vues adjoindre des coefficients multiplicatifs selon les heures de la journée, comme le montre la Figure 5.10. Le matin (7h - 11h), la forte consommation en

eau se traduit par des coefficients de multiplication de la demande en eau supérieurs à 1. La nuit en revanche, moins d'eau est consommée et ces coefficients sont inférieurs à 1.

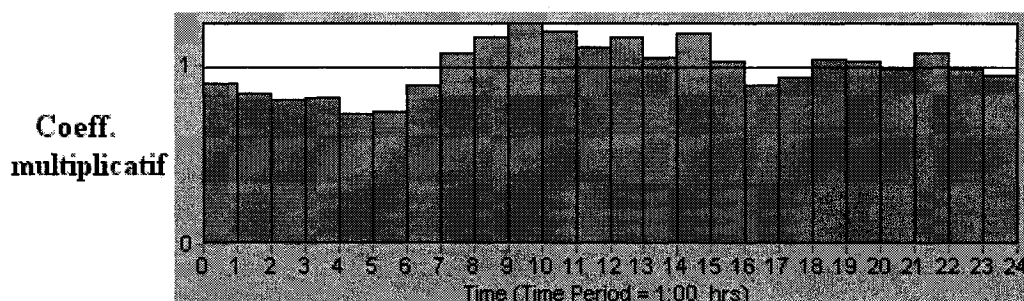


Figure 5.10 : Coefficients multiplicatifs suivant les heures d'une journée (adapté du logiciel EPANET).

-Direction des écoulements :

Afin d'étudier le réseau dans le cas le plus général possible, il a été choisi de travailler en régime permanent. La première simulation a donc consisté à connaître à partir de quel moment la modélisation du fonctionnement hydraulique du réseau était en régime permanent. Pour cela, une modélisation de qualité prenant en compte l'âge de l'eau a permis de noter qu'à partir de la 300^{ième} heure de simulation, cet âge se stabilisait autour d'un âge moyen pour chaque réservoir de la zone. Ainsi, il a été conclu qu'à partir de la 300^{ième} heure de simulation, le régime de fonctionnement était permanent.

Il a été possible ensuite d'étudier les directions des écoulements d'eau dans les conduites en régime permanent. La Figure 5.11 résume de façon schématique ces sens d'écoulements tout au long d'une journée. Ces écoulements sont des sens théoriques car ils proviennent de la simulation EPANET et n'ont pas été vérifiés sur le terrain.

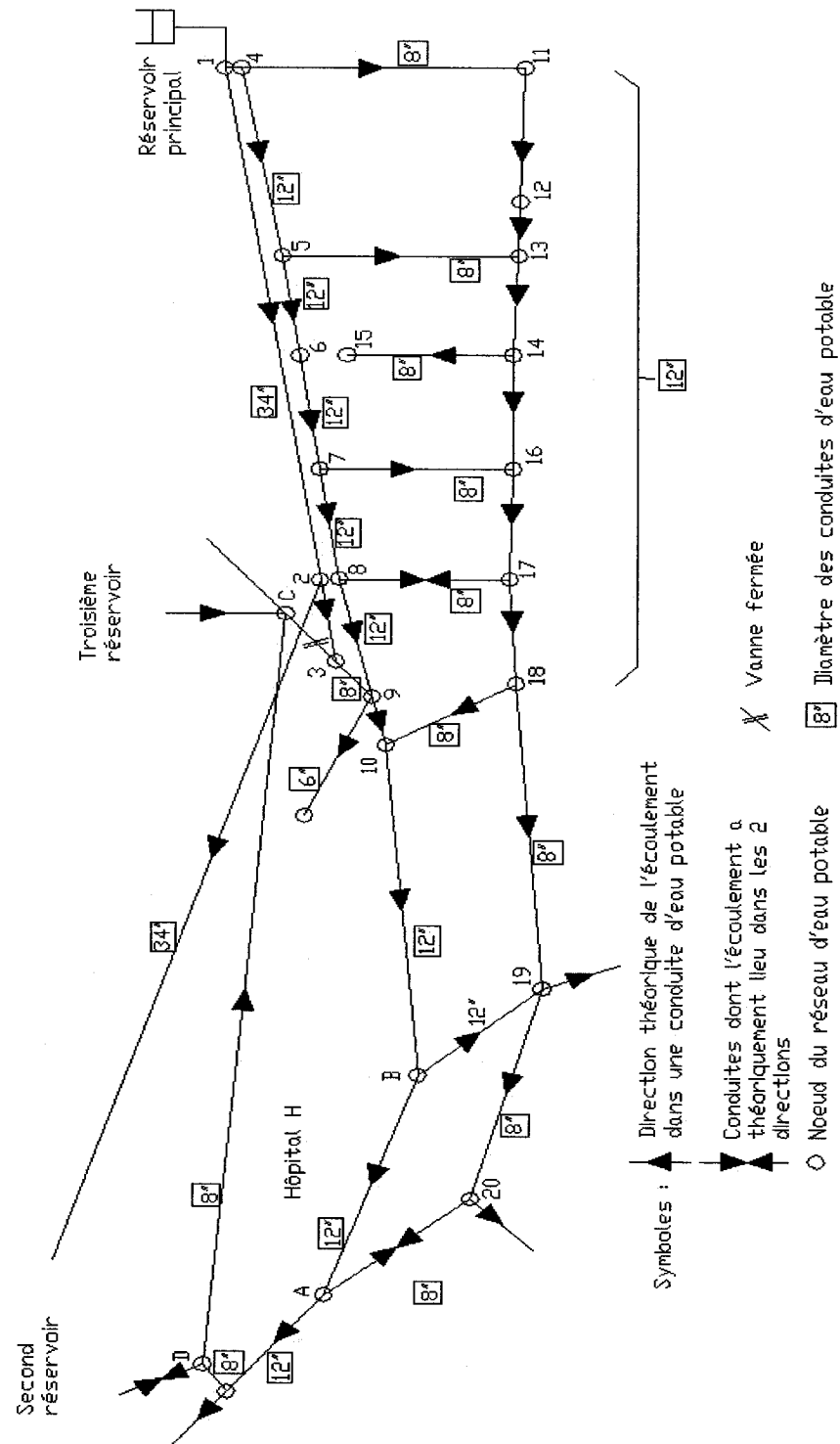


Figure 5.11 : Schéma du sens théorique d'écoulement de l'eau dans les conduites en régime permanent

Comme le montre la Figure 5.11, les nœuds C et D de l'hôpital H sont alimentés par les second et troisième réservoirs. L'étude de ces chemins hydrauliques ne sera pas réalisée ici. Seuls les chemins hydrauliques depuis le réservoir principal menant aux nœuds A et B de l'hôpital H seront étudiés. Il y a 3 chemins hydrauliques principaux menant aux nœuds A et B :

- Conduites reliant les nœuds 1-2-3-9-10-B-A ;
- Conduites reliant les nœuds 4-5-6-7-8-9-10-B-A ;
- Conduites reliant les nœuds 4-11-12-13-14-16-17-18-10-B-A avec la possibilité 4-11-12-13-14-16-17-18-19-20-A.

Il faut évidemment prendre en compte toutes les interconnexions possibles comme celles entre les nœuds 5-13 ou 8-17.

Remarque : les numéros donnés ici correspondent aux nœuds ou jonctions entre conduites. Les conduites sont donc définies par les 2 nœuds à leurs extrémités (conduites 1-2, 4-11, etc.). Afin de ne pas alourdir les notations, lorsqu'il s'agit de successions de conduites, les nœuds seront notés bout à bout (1-2-3 signifie conduites 1-2 et 2-3).

-Modélisations d'intrusions de contaminants dans le réseau :

Pour connaître et hiérarchiser les rôles critiques des conduites vis-à-vis de leurs potentiels à amener en plus ou moins grandes quantités des contaminants aux nœuds A et B de l'hôpital H, des simulations d'intrusions ont été réalisées. Différentes hypothèses ont été posées :

- les accumulations et relargages d'agents pathogènes dans ou depuis les biofilms des conduites sont ignorés ;
- l'effet d'inactivation des agents pathogènes par le chlore résiduel ne sera pas considéré ;
- les intrusions de pathogènes se feront à travers les nœuds du modèle et non à travers les conduites.

Ces hypothèses simplifient grandement la simulation de contamination. Il aurait été intéressant de tenir compte de l'effet d'inactivation des agents pathogènes par le chlore résiduel présent dans le réseau, comme l'ont fait Propato *et al.* (2004) et Baribeau *et al.* (2005). Le chlore peut, selon les cas, modifier grandement les quantités d'agents pathogènes qui se sont introduites. Ainsi, selon Baribeau *et al.* (2005), une concentration en chlore libre de 0,5 mg/L dans un réseau d'eau potable permettrait de contrôler l'ensemble des contaminants moyennement résistants au chlore (contaminants dont la résistance au chlore libre est équivalente ou inférieure à celle d'*E.coli*), mais reste inefficace pour les contaminants plus résistants, du type *Giardia* ou *Cryptosporidium*. Néanmoins, l'auteur fait remarquer que le modèle d'inactivation cinétique retenu était issu d'études en laboratoires mais qu'il pouvait être différent en réseau. De plus, l'extension d'EPANET utilisée pour réaliser ces simulations n'est pas encore disponible et, est pour l'instant testée par des spécialistes en vue de l'améliorer. Il serait intéressant, plus tard, d'utiliser cette extension afin de pouvoir tenir compte de l'inactivation microbienne due au chlore résiduel, notamment pour les contaminants dont les courbes de dose-réponse ont été données en 5.2.2.2. La simulation ne sera donc valable que pour des situations où le chlore résiduel serait nul dans le réseau d'eau potable de Montréal (ce qui n'est pas le cas en temps normal), ou pour simuler l'intrusion d'agents pathogènes résistants au chlore résiduel. La simulation va donc être réalisée en prenant l'agent pathogène *Giardia* comme contaminant.

Le Tableau 5.4 (page 81) indique que les concentrations moyennes de *Giardia* dans les eaux usées s'étendent de 10^3 à 10^4 organismes par 100 mL. La concentration de 50 000 organismes par litre a été retenue. Baribeau *et al.* (2005) faisant remarquer qu'une fuite permettant le mélange d'un pour-cent d'eau usée avec l'eau potable du réseau serait détectée rapidement, il a été choisi de simuler l'intrusion de 0,3% d'eau usée au sein du réseau (Gibbs *et al.* 2004). À partir du nœud où l'intrusion aura lieu, la concentration de l'eau en aval de ce nœud contiendra 0,3% d'eau usée durant toute la durée de l'intrusion. La concentration de l'eau sortant du nœud d'intrusion sera donc de 150 kystes de

Giardia par litre. Le logiciel permet ensuite de savoir quelle proportion de cette intrusion se retrouvera aux nœuds A et B de l'hôpital H. Le pourcentage d'intrusion de 0,3% a également été retenu par Gibbs *et al.* (2004) pour évaluer les capacités du chlore à inactiver les organismes présents dans le biofilm d'un réseau d'eau potable après une simulation de jonction fautive de 72h. Cela amène la question de la durée de l'intrusion.

Pour connaître l'effet des durées d'intrusions, différentes durées ont été testées, à différents moments de la journée. Cela permettra d'appliquer ensuite le scénario le plus réaliste à différents nœuds. Pour un nœud choisi, le 4, suffisamment éloigné de l'hôpital H pour voir se développer la contamination, différentes durées d'intrusions de 4h et 6h ont été testées à des moments critiques de la journée (Figure 5.10 page 91) : à 2h du matin (faible consommation) et à 7h du matin (forte consommation). Deux scénarios de longues contaminations ont également été testés de 7h à 16h et de 23h à 6h. Tous ces tests ont été réalisés en régime permanent, après la 300^{ième} heure de simulation. Les simulations débutent à la 362^{ième} heure (15^{ième} jour 2h du matin) ou 367^{ième} heure (15^{ième} jour 7h du matin). Différentes données ont été relevées et sont présentées dans le Tableau 5.6. Différents points sont notés :

- les concentrations moyennes en organismes prévus aux nœuds A et B de l'hôpital H, tout comme les pics de contamination, sont généralement plus élevés lorsque l'épisode d'intrusion se produit en période de plus faible consommation (à 2h00 AM). Une exception est à noter : la concentration au nœud A pour l'essai de 4h d'intrusion s'est avérée plus importante à 7h00 AM (75 organismes/L/h) qu'à 2h00 AM (60 organismes/L/h). Cela s'explique par le fait que l'épisode de contamination est plus court à 7h00 AM (5h), période de forte consommation.
- les concentrations moyennes en organismes reçus aux nœuds A et B de l'hôpital H sont généralement plus élevées lorsqu'un épisode de 6h d'intrusion est modélisé.
- la vague de contamination arrive plus rapidement au nœud B qu'au nœud A. Cela s'explique par le design même du réseau d'eau potable.

Tableau 5.6 : Essais de différentes durées et heures d'intrusions.

Durée d'intrusion et heure d'intrusion	Noeud A				Noeud B			
	Pic de contamination (kystes/L)	Durée de contamination (h)	Heure de début de la contamination (h)	Concentration moyenne de contaminants reçus durant la durée de contamination (kystes/L/h)	Pic de contamination (kystes/L)	Durée de contamination (h)	Heure de début de la contamination (h)	Concentration moyenne de contaminants reçus durant la durée de contamination (kystes/L/h)
4h-2h00 AM	121	7h	1h-2ham	60	119	6h	1h-2ham	81
4h-7h00 AM	100	5h	7h-8ham	75	103	6h	6h-7ham	66
6h-2h00 AM	121	8h	1h-2ham	85	119	8h	1h-2ham	84
6h-7h00 AM	103	7h	7h-8ham	82	103	8h	6h-7ham	75
9h-7h00 AM	122	10h	7h-8ham	85	121	10h	6h-7ham	90
8h-23h00 PM	121	10h	22h-23hpm	93	119	10h	22h-23hpm	90

Il est donc juste de considérer que, pour ce secteur, les épisodes d'intrusions ayant lieu lors de périodes de faibles consommations entraînent des concentrations plus élevées en agent pathogène. Néanmoins, étant justement en période de faible consommation, il est raisonnable de considérer que ces contaminations affecteront un nombre moins élevé de personnes (la vague de contamination atteint l'hôpital H dès 2h00 AM, période de faible consommation). C'est pourquoi il a été choisi de réaliser les prochaines simulations en période de forte consommation, périodes où un plus grand nombre de personnes risque de consommer de l'eau contaminée.

Quant à la durée d'intrusion à simuler, il a été considéré que des intrusions de 6h étaient moins probables. Celles de 4h semblent mieux correspondre à la durée nécessaire pour détecter la contamination et isoler le secteur de l'intrusion. De plus, les tests de longues durées de contaminations, en périodes de faible ou forte consommations, montrent que passé 6h d'intrusion, les concentrations en agent pathogène n'augmentent plus beaucoup au niveau des nœuds A et B, même si la durée d'exposition augmente. De même, les pics de contamination ne sont pas plus élevés. Ainsi, il ne serait pas utile, pour l'étude, de modéliser des contaminations au-delà de 6h d'intrusion, les concentrations en contaminants arrivant à des paliers (90 organismes/L lors d'une intrusion de 150 organismes/L au nœud 4).

Les paramètres de l'intrusion type étant choisis (durée : 4h ; période de forte consommation : 7h00 AM ; 150 organismes/L sortant des nœuds d'intrusion), il est possible de procéder au classement des différents nœuds du réseau quant à leurs potentiels à convoyer des quantités plus ou moins grandes de contaminants aux nœuds A et B de l'hôpital H. Étant donné la taille restreinte du réseau, la quasi-totalité des nœuds seront testés. Dans le cas d'un réseau plus étendu, il sera possible de ne considérer que quelques nœuds bien choisis afin de ne pas perdre trop de temps. Le Tableau 5.7 (page 99) donne les résultats obtenus.

Suivant les nœuds d'intrusion choisis, les pics de contamination qui atteignent l'hôpital H varient de 0 à 150 organismes/L. Les durées de contaminations, définies comme le nombre d'heures où les concentrations en contaminants ne sont pas nulles aux nœuds A et B, varient de 0h à 6h, mais sont généralement de 5 à 6h. Sachant que des intrusions de 4h sont simulées, il est possible d'en déduire que le temps de séjour de l'eau dans les conduites est d'une à deux heures maximum avant d'atteindre les nœuds A et B. Ces temps de séjour sont relativement courts et cela minimise d'autant plus l'effet d'inactivation qu'aurait eu le chlore libre sur des agents pathogènes résistants. Le fait de ne pas avoir modélisé l'effet du chlore résiduel n'est donc pas pénalisant sachant que les simulations concernent des organismes résistants (*Giardia*).

Les heures d'arrivée (6h-7h AM, 7h-8h AM) des vagues de contaminations aux nœuds A et B sont relativement semblables. Cela est dû à la proximité même des nœuds d'intrusion aux nœuds A et B. Il peut être étonnant de voir que, l'intrusion ayant lieu à 7h AM, des contaminants commencent à apparaître entre 6h et 7h AM aux nœuds A et B. Cela est simplement le résultat des calculs de modélisation d'EPANET et pour l'étude, cela n'interfère pas sur les résultats (le but étant d'obtenir un classement, une « erreur » répétée ne modifiera pas ce classement). Enfin, le dernier paramètre relevé est la concentration moyenne de contaminants reçus durant la durée de contamination, qui s'étend de 0 à 120 organismes/L/h. 120 organismes/L/h est la concentration moyenne maximale qui puisse être obtenue, étant donné que les calculs de modélisation du logiciel étendent la contamination sur 5h.

Tableau 5.7 Classement des nœuds d'intrusion suivant leur potentiel à amener des contaminants aux nœuds A et B

Numéro des nœuds d'intrusion	Nœud A				Nœud B				Classement des nœuds	
	Pic de contamination (kystes/L)	Durée de contamination (h)	Heure de début de la contamination (h)	Concentration moyenne de contaminants reçus durant la durée de contamination (kystes/L/h)	Pic de contamination (kystes/L)	Durée de contamination (h)	Heure de début de la contamination (h)	Concentration moyenne de contaminants reçus durant la durée de contamination (kystes/L/h)	Nœud A	Nœud B
1	150	6h	6h-7ham	95	150	6h	6h-7ham	93	3	3
3	53	5h	6h-7ham	38	53	5h	6h-7ham	39	9	9
4	100	5h	7h-8ham	75	103	6h	6h-7ham	66	4	4
5	93	6h	6h-7ham	52	95	6h	6h-7ham	62	8	6
6	86	6h	6h-7ham	57	87	6h	6h-7ham	57	7	7
7	86	6h	6h-7ham	58	87	6h	6h-7ham	57	6	7
8	84	5h	6h-7ham	65	82	5h	6h-7ham	64	5	5
9	128	5h	6h-7ham	100	128	5h	6h-7ham	102	2	2
10	150	5h	6h-7ham	120	150	5h	6h-7ham	120	1	1
11	9	5h	7h-8ham	7	9	5h	7h-8ham	7	15	15
12	9	5h	7h-8ham	7	9	5h	7h-8ham	7	15	15
13	16	5h	7h-8ham	12	16	5h	7h-8ham	11	12	13
14	16	5h	7h-8ham	12	16	5h	6h-7ham	11	12	13
16	21	6h	6h-7ham	12	21	5h	6h-7ham	16	12	12
17	24	5h	6h-7ham	18	24	5h	6h-7ham	18	10	10
18	24	5h	6h-7ham	18	24	5h	6h-7ham	18	10	10
19	4	2h	13h-14hpm	2	0	0h		0	17	17
20	4	2h	13h-14hpm	2	0	0h		0	18	17

Étant donné que les paramètres de durée et heure d'arrivée de la contamination varient très peu (excepté pour les nœuds 19 et 20 qui n'ont qu'une faible influence sur les nœuds A et B), seuls les paramètres de pics de contamination et de concentration moyenne en contaminant ont été retenus pour établir le classement des nœuds d'intrusion. Ce classement représente le potentiel des nœuds d'intrusion testés, à amener une quantité plus ou moins grande en contaminant à l'hôpital H, en régime permanent. Plus le classement est élevé, plus le nœud est critique. Il est possible d'identifier des catégories de conduites suivant ce potentiel :

- conduites à potentiel élevé : 1-2-3-9-10-B-A ;
- conduites à potentiel modéré : 4-5-6-7-8-9, 4-11, 8-17 ;
- conduites à potentiel faible : 11-12-13-14-16-17-18-10, 13-5, 16-7 ;
- conduites à potentiel très faible : 14-15, 18-19-20-A, 19-B.

Ainsi, si une intrusion comme celle modélisée ici venait à se produire sur les conduites à potentiel élevé, il faut que l'hôpital H s'attende à recevoir une contamination d'environ 90 organismes/L (moyenne approximative des concentrations reçues aux nœuds A et B après les simulations d'intrusions depuis les nœuds à potentiels élevés) sur une durée de 5 à 6h.

5.4.1.3 Données sur les facteurs externes

Il s'agit maintenant de s'intéresser aux facteurs externes au réseau d'eau, qui peuvent jouer un rôle particulier lors d'un épisode de contamination.

- Les égouts :

Les égouts représentent la principale source de contaminants, s'il est fait abstraction des actes de contamination volontaire. Il est donc pertinent de recueillir des données les concernant. Différentes données ont été fournies par la ville de Montréal sur la zone étudiée : les diamètres, les matériaux et les sens d'écoulements. Ces données sont présentées à la Figure 5.12.

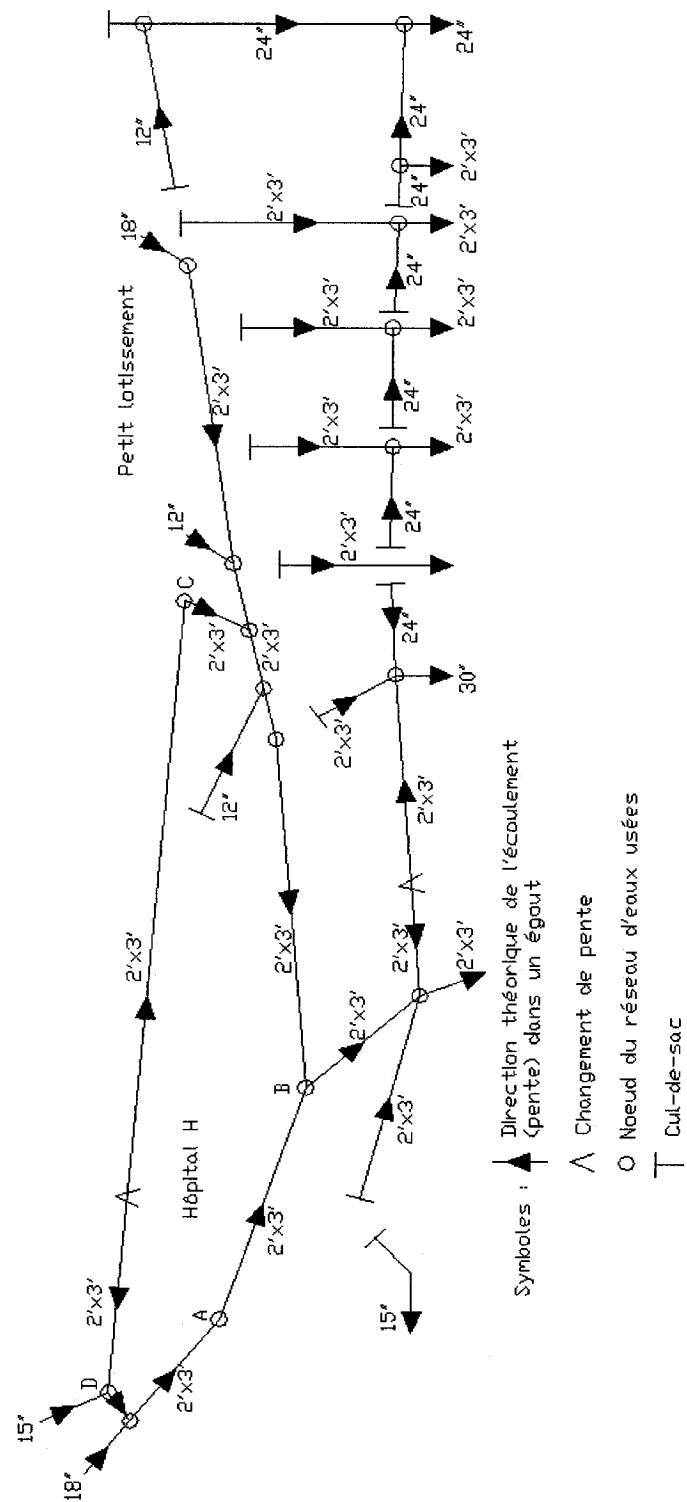


Figure 5.12 : Schéma du réseau d'égouts sur la zone étudiée

Le réseau d'égout sur la zone a un fonctionnement gravitaire, les écoulements suivent la pente naturelle selon la topographie du secteur. Ce réseau est de type combiné, c'est-à-dire qu'il reçoit les eaux usées et les eaux pluviales. La Figure 5.12 montre que les égouts sont implantés parallèlement aux conduites d'eau potable. L'étude du sens d'écoulement montre que le point B de l'hôpital est au croisement de 2 zones de récupérations : une première zone issue du nœud A et une deuxième provenant du « petit lotissement ». Les eaux usées sont ensuite convoyées en contrebas de l'hôpital H. Ainsi, il est possible de considérer la zone autour du point B comme étant critique vis-à-vis du drainage des égouts. Pour le reste de la zone d'étude, les eaux usées sont drainées en contrebas par de nombreuses conduites et ainsi évacuées rapidement (peu de stagnation). Pour ce qui est des diamètres et des matériaux des égouts, les conduites dont le diamètre est indiqué en pouces (15'' (381 mm), 18'' (457,2 mm), 24'' (609,6 mm) et 30'' (762 mm)) sont en béton armé. Les conduites indiquées 2'x 3' (609,6 x 914,4 mm) sont des conduites de forme ovoïdales en briques et mortier qui font 2 pieds de largeur et 3 pieds de hauteur. La Figure 5.13 donne une illustration de ce type d'égouts. Sur la zone, la majorité des conduites est donc en briques et ciment.

Quant à l'année de pose des conduites d'égouts, les experts consultés sont d'avis de considérer que ces années sont les mêmes que celles de pose des canalisations d'eau potable, les deux réseaux ayant été très certainement réalisés simultanément.



Figure 5.13 : Conduite d'égout en briques et ciment 2'x 3' ovoïdale, venant d'être réhabilitée (Ville de Montréal 2006).

Les égouts allant du nœud A jusqu'au « petit lotissement » datent des années 1875. Concernant l'état réel du réseau d'égout sur la zone, peu de données terrains sont disponibles. Néanmoins, les experts contactés considèrent que ces conduites sont en bons états structural et hydraulique. Cependant, ils sont moins optimistes concernant leur étanchéité, les briques et le mortier ayant baigné dans des eaux usées durant des décennies. De plus, toujours selon ces experts, une fissure longitudinale se propage dans la plupart des cas lors de la sollicitation due aux véhicules, et cela dès les premiers passages des véhicules. Enfin, le mortier utilisé pour assembler les briques ne garantit pas un niveau d'étanchéité optimal. Ainsi, il est raisonnable de considérer que ces égouts de briques permettent l'infiltration dans les sols d'une certaine quantité d'eaux usées. Par contre, étant donné les dénivelés naturels que présente ce secteur, il y a peu de risque d'accumulation ou de débordement d'eaux usées. Les experts ont fait remarquer, à juste titre, que ces égouts étaient réalisés ainsi, dans le but de pouvoir être visités et que par conséquent, ils étaient surdimensionnés, réduisant d'autant les chances de débordement ou de mise en charge, même lors des orages.

Là encore, peu de documents existants traitent de la durée de vie utile des égouts. Martin (2005) a présenté les caractéristiques retenues pour un modèle d'analyse de risques appliqué sur le réseau d'égouts de la municipalité de Seattle. Les données concernant la durée de vie utile des conduites de différents matériaux ont été reproduites dans le Tableau 5.8. Les conduites en béton ou briques auraient des durées de vie de 80 ans. En se fiant à ces données, toutes les conduites, exceptées celles de 1955, auraient déjà dépassé leur durée de vie utile.

Tableau 5.8 : Vies utiles (en années) de conduites suivant leurs matériaux (adapté de Martin (2005)).

Matériaux	Premier défaut	Durée de vie restante	Vie utile totale
Argile vitrifiée, grès	20	100	120
Béton	20	60	80
Revêtement internes	20	30	50
PVC	20	80	100
Béton asphalté	20	60	80
Briques	20	60	80
Fonte ductile	20	60	80
Fonte grise	20	60	80
Métal ondulé	20	40	60

Des études plus poussées seraient nécessaires pour s'assurer de la vie utile réelle que peuvent avoir des conduites en briques ou béton armé. Néanmoins, étant donné les années de poses sur la zone, il est raisonnable de penser que les conduites les plus vieilles l'ont dépassée ou sont sur le point de la dépasser.

Une donnée intéressante, mais dont il ne sera pas tenu compte dans cette étude, est la localisation exacte des égouts provenant de l'hôpital H. Les concentrations en agents pathogènes et produits pharmaceutiques de ces eaux usées doivent être supérieures à la normale. Il serait par conséquent judicieux de les localiser par rapport aux entrées de services en eau potable de l'hôpital.

Des données concernant la profondeur des regards d'égouts étaient disponibles mais elles ne seront pas prises en compte dans cette étude car ces données ne peuvent être comparées avec celles des conduites d'eau potable.

Les données qui peuvent être retenues pour caractériser le secteur sont donc les quantités d'eaux usées convoyées selon les sens d'écoulement et le design du réseau, l'âge de pose des égouts (identique à celui des aqueducs), et enfin les matériaux de construction (béton armé et briques).

- Autres facteurs externes :

La nappe phréatique ne joue pas de rôle ici étant donné que la zone se situe suffisamment au-dessus de sa surface. Ces données n'ont donc pas été nécessaires. Sur le secteur d'étude, la topographie ne permet pas de différencier des sous zones particulières : il y a toujours une pente de même direction sur le secteur, donc pas de zone propice aux accumulations par exemple. Vis-à-vis de la menace constituée par les contaminations non volontaires, le secteur ne comporte pas d'usine particulière, et aucun parc de stockage de produits dangereux ou nocifs n'a été identifié. Il n'y a, a priori, pas de risque particulier à ce sujet sur la zone d'étude.

5.4.2 Analyse des résultats et hiérarchisation finale proposée

L'analyse des résultats obtenus au travers des critères retenus est assez simple ici puisque globalement, quel que soit le critère retenu, le classement des conduites à réhabiliter en priorité vis-à-vis de l'hôpital H varie peu.

En s'intéressant à l'âge des conduites d'aqueducs, couplé à la durée de vie utile des conduites elle-même dépendant des matériaux, un premier classement peut être obtenu :

- conduites de 130 ans, fonte grise première génération, durée de vie utile 120 ans, joints à base de plomb : 4-5-6-7-8-9-10-B-A, B-20 ;
- conduites de 95 ans, fonte grise première génération, durée de vie utile 120 ans, joints à base de plomb : 4-11, 5-13, 14-15, 7-16, 8-17, 10-18, 18-20 ;
- conduites de 75 ans, fonte grise deuxième génération ou béton armé avec anodes, durée de vie utile 100 ans, joints à base de plomb : 1-2-3-9, 19-20-A ;
- conduites de 55 ans, fonte grise troisième génération, durée de vie utile 75 ans, joints à garniture : 11-12-13-14-16-17-18.

En considérant l'aspect stratégique d'une canalisation vis-à-vis de son potentiel à convoyer une vague de contaminants lors d'une intrusion, un deuxième classement a été obtenu :

- conduites à potentiel élevé : 1-2-3-9-10-B-A ;
- conduites à potentiel modéré : 4-5-6-7-8-9, 4-11, 8-17 ;
- conduites à potentiel faible : 11-12-13-14-16-17-18-10, 13-5, 16-7 ;
- conduites à potentiel très faible : 14-15, 18-19-20-A, 19-B.

En prenant en compte le facteur externe lié aux égouts, une dernière distinction entre conduites peut être obtenue :

- conduites à proximité d'égouts âgés (130 ans) faits de briques et ciment dont la configuration charrie les eaux usées en direction de l'hôpital H ou les concentre : 1-2-3-9-10-B-A, 4-5-6-7-8-9, B-19 ;
- les autres conduites.

Étant donné que ces 3 classements se recoupent globalement, il n'est pas nécessaire de comparer les critères entre eux. Cependant cette situation semble assez exceptionnelle et, très souvent, il sera nécessaire d'ouvrir un dialogue avec les différents experts des domaines mis en jeu. Ce dialogue doit permettre de faire ressortir les points de vue de chacun afin d'obtenir un classement final qui prenne en compte les particularités mêmes de la zone. Cela permettra à chacun d'avoir une vision différente du problème, qui pourra par la suite, amener à reconsidérer son jugement sur l'importance d'autres facteurs, étrangers à son propre domaine.

À ce stade de la démarche, il apparaîtrait intéressant de vouloir attribuer des coefficients de poids à chaque critère. Cependant, une mise en garde s'impose quant à leur utilisation. S'ils permettent de simplifier l'analyse globale de l'étude (il ne serait plus nécessaire de réunir les experts des domaines impliqués pour départager les critères), il se peut que l'emploi de coefficients pondérateurs modifie ou atténue certains aspects de l'étude. Suivant la pondération et les critères retenus, il se peut que deux conduites obtiennent le même poids final alors que leurs configurations peuvent être tout à fait différentes. L'emploi de coefficients peut ne pas refléter véritablement la justesse de l'information. De plus, lorsque ces situations se produisent, il faut quand même des

discussions pour départager les conduites. Ainsi, si l'utilisation de coefficients de pondération semble intéressante, permettant d'avoir une analyse mécanique des données, elle n'est pas forcément conseillée ici, étant donné que chaque zone d'étude a des contraintes spécifiques qui ne sont pas comparables avec d'autres zones a priori.

Dans le cadre de l'étude de l'hôpital H, selon les critères obtenus, voici la hiérarchisation des conduites d'eau potable à réhabiliter qui a été retenue :

- Conduites très critiques pour l'hôpital H : conduites d'eau très âgées, potentiel à charrier des contaminants vers l'hôpital H élevé, égouts très âgés en briques : 1-2-3-9-10-B-A, 4-5-6-7-8-9 ;
- Conduites critiques pour l'hôpital H : conduites d'eau âgées, potentiel à charrier des contaminants vers l'hôpital H modéré, égouts moins critiques pour l'hôpital : 4-11, 5-13, 7-16, 8-17, 10-18, B-19 ;
- Conduites moins critiques pour l'hôpital H : conduites d'âge moyen, potentiel à charrier des contaminants vers l'hôpital H faible, égouts moins critiques pour l'hôpital : 11-12-13-14-16-17-18-19-20-A, 14-15.

La Figure 5.14 donne une représentation schématique de ce classement. Cette répartition dans ces classes a été réalisée en fonction des classements obtenus pour chaque critère, en essayant d'être le plus pertinent possible. Pour chaque niveau de criticité, il est possible d'attribuer un niveau moyen de contaminants probable qui atteindra l'hôpital H, si une intrusion telle que celle étudiée ici venait à se produire. Ainsi, selon l'intrusion modélisée dans cette étude, les conduites très critiques pour l'hôpital H peuvent amener des concentrations élevées de 90 kystes de *Giardia*/L/h, celles critiques et moins critiques des concentrations d'environ 15 kystes de *Giardia*/L/h.

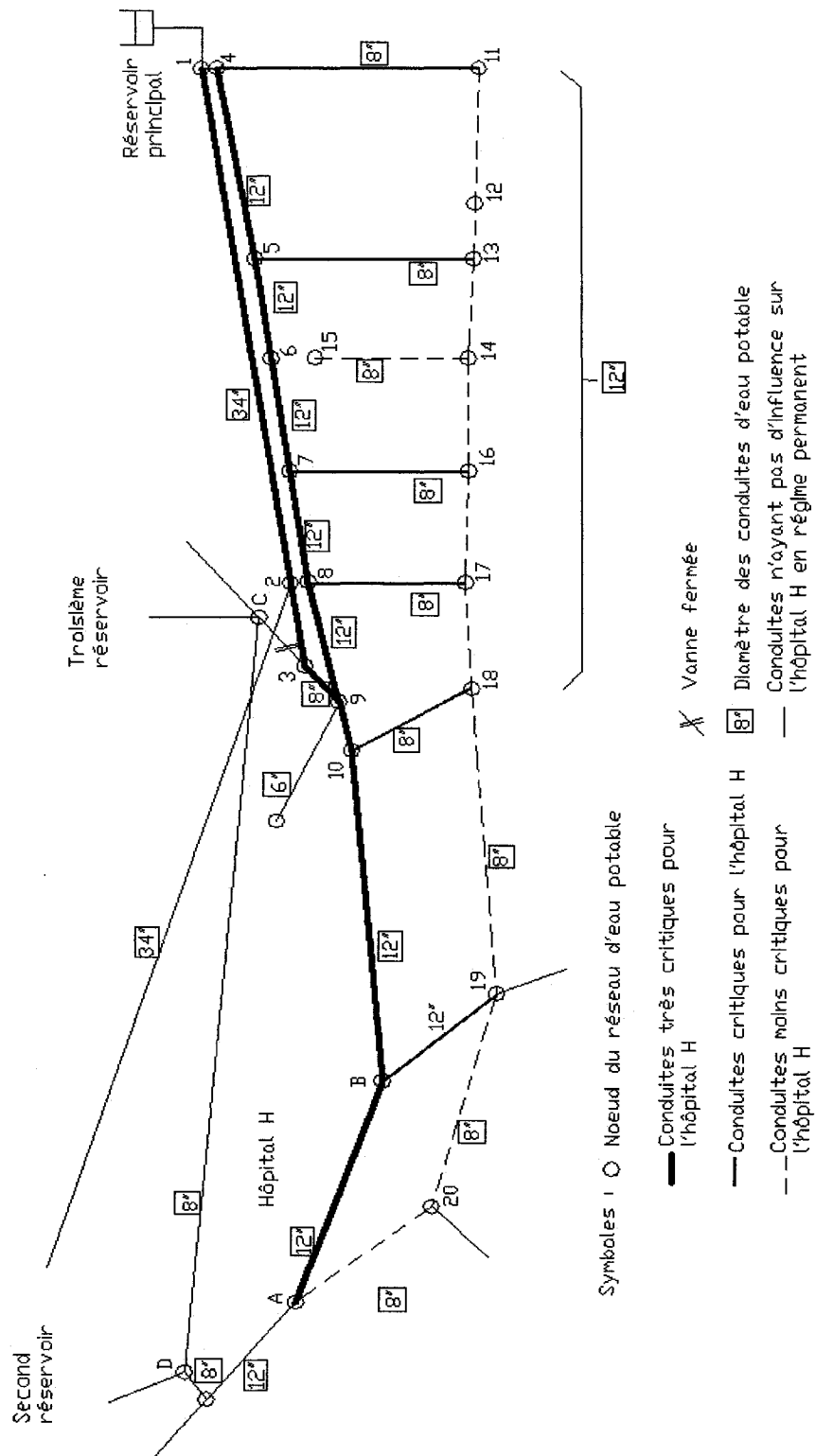


Figure 5.14 : Hiérarchisation des conduites selon leur degré de criticité pour l'hôpital H

5.4.3 « Remontée » de la chaîne des conséquences

Dans l'exemple considéré, l'hôpital H atteignait un niveau d'affectation inacceptable si 6% de son personnel était absent une semaine ou si 20% était absent le même jour. Les courbes de dose-réponse associées à l'organisme *Giardia* n'étant pas suffisamment précises au niveau du risque de 6% d'être infecté, l'attention se portera donc sur le risque à 20% d'être infecté. La courbe, présentée à la Figure 5.7 (page 69), fait correspondre une quantité de 11 kystes de *Giardia* à ingurgiter pour atteindre un risque de 20% d'être infecté. En étant conservateur, il peut être considéré qu'un membre du personnel absorbe 250 ml d'eau du robinet dans sa journée de travail. Il est raisonnable d'étaler cette journée de travail sur 8h. Suivant l'intrusion modélisée, la durée de contamination aux robinets de l'hôpital H était de 5h minimum. Il faut donc que le personnel ingurgite 11 kystes de *Giardia* durant l'épisode de contamination. 250 mL d'eau du robinet consommée sur 8h revient à consommer environ 30 mL d'eau par heure, soit 150 mL d'eau en 5 heures. Les 11 kystes de *Giardia* doivent se retrouver dans ces 150 mL, ce qui donne au final une concentration en *Giardia* de 73 organismes/L aux robinets de l'hôpital H.

Comme dit précédemment en 5.4.1.1, l'idéal serait de pouvoir connaître la localisation (nœuds du réseau) et les paramètres de la contamination, nécessaires à l'obtention aux robinets de l'hôpital H d'une telle concentration en *Giardia*. Cela étant impossible pour le moment, il faut donc se contenter des essais modélisés pour lesquels les paramètres et les localisations des contaminations ont été fixés.

D'après ces essais, pour l'intrusion modélisée (0,3% d'intrusion d'eaux usées, pendant 4h en période de forte consommation, sans effet d'inactivation lié au chlore résiduel du réseau, en régime permanent), les conduites classées comme très critiques peuvent convoyer des vagues de contaminations étendues sur 5 heures à des concentrations moyennes de 90 kystes de *Giardia*/L/h et plus. Le seuil calculé de 73 kystes de *Giardia*/L sur 5h de contamination qui engendrerait un niveau d'affectation inacceptable

pour l'hôpital étant inférieur à cette concentration moyenne de 90 *Giardia*/L/h, il y a de fortes possibilités pour qu'une telle contamination entraîne de sérieux problèmes pour l'hôpital H. Toutefois, les conduites classées comme étant « critiques » et « moins critiques » qui amèneraient une concentration en contaminant de 15 *Giardia*/L/h ne devraient pas affecter l'hôpital H au point que son fonctionnement soit perturbé de façon intolérable.

Il peut être intéressant maintenant, de « re-descendre » vers les conséquences premières, en ayant une approche causale avec un scénario précis, pour connaître l'affectation qu'une contamination telle que simulée, pourrait faire subir à l'hôpital H. Toujours en considérant que les membres du personnel boivent 150 mL d'eau du robinet en 5h (scénario plutôt conservatif), l'ingestion de 150 mL d'une eau comportant 15 *Giardia*/L revient à ingérer 2,25 *Giardia*. Sur la courbe dose réponse de la Figure 5.7 (page 69), le risque d'infection correspondant à une injection de ce type n'est malheureusement pas évalué précisément. Il peut être considéré néanmoins que ce risque d'infection est compris entre 0 et 10%. Sur la courbe d'affectation du fonctionnement de l'hôpital en fonction de son personnel présentée à la Figure 5.1 (page 59), il est alors possible de voir que pour 15 personnes absentes (10% du personnel total), le niveau d'affectation peut être faible pour 1 jour d'absence, tolérable pour 2 ou 3 jours d'absences et inacceptable pour une semaine d'absence.

5.4.4 Retour sur l'approche globale

5.4.4.1 Précisions sur l'application

Une caractérisation et hiérarchisation des conduites qui desservent l'hôpital H vis-à-vis de la mission Qualité du réseau d'eau potable vient d'être obtenue. Ces résultats ne sont pas à considérer du point de vue de leurs exactitudes ou précisions. De nombreuses hypothèses ont été réalisées et sont très discutables. La concertation d'experts dans tous

les domaines impliqués aurait permis d'obtenir très certainement des résultats plus proches de la réalité. Cependant, l'exercice présenté ici se veut simplement une illustration des possibilités qui peuvent être exploitées en utilisant cette démarche d'analyse de risques et il se peut que certaines lacunes apparaissent à certaines étapes de la démarche.

Un seul élément du réseau Santé de la ville de Montréal a été étudié ici, et simplement sur une partie du réseau qui l'alimente. Si cette méthode était appliquée sur cette Infrastructure Essentielle (IE) toute entière, avant de vouloir prioriser les travaux pour cet hôpital H, il faudrait connaître son niveau d'essentialité vis-à-vis de l'IE elle-même. S'il s'avérait qu'il soit primordial, alors des travaux pourraient être entrepris afin de minimiser les risques de perturbations dans son fonctionnement face à un problème de qualité d'eau potable posé par le réseau. Les travaux pourraient alors débiter par la réhabilitation des conduites dites « très critiques » pour l'hôpital H. S'il est jugé ensuite que les autres conduites de l'hôpital H sont moins prioritaires que celles d'un autre hôpital, les travaux pourront alors se déplacer vers cet autre élément. Ainsi, les plus gros risques de problèmes liés à des chutes de qualités imputées au réseau de conduites pour les éléments primordiaux de l'IE seront bien atténués.

5.4.4.2 Commentaires sur la démarche proposée

Cette application a permis d'illustrer les possibilités de cette démarche d'analyse de risque, ses avantages mais également ses limites.

Tout d'abord, plusieurs avantages sont à noter concernant les caractéristiques générales de l'approche. Son aspect multidisciplinaire peut permettre aux différentes parties présentes d'ouvrir de nouvelles directions de réflexions. Chaque domaine n'est pas étudié individuellement, séparément, mais plutôt en relation directe avec les domaines concernés. Les responsables des différentes parties peuvent alors prendre la pleine mesure de l'ampleur que peut provoquer un incident dans leur domaine sur les entités en

aval. Dans bien des études, ce sont ces mêmes liens inter domaines qui sont souvent « oubliés ». Ici, l'accent est mis sur ces relations existantes entre domaines, relations qui permettent de caractériser convenablement et de préciser les conséquences d'un dysfonctionnement dans un domaine particulier (le réseau d'eau potable dans cette étude) sur un autre domaine (le réseau Santé par exemple). La mise en place de cette approche doit aboutir à une entente entre les différents domaines : chaque représentant connaît les conséquences qui peuvent découler d'un incident qui surviendrait sur l'infrastructure dont il est responsable. Cela peut donc contribuer à augmenter son professionnalisme. De plus, le fait d'étudier et de caractériser ces liens doit permettre une amélioration de la gestion globale des crises. Vis-à-vis de l'application, non seulement l'étude montre les zones qui sont critiques pour l'hôpital H, mais il peut très bien être entrepris par la suite de mettre en place des plans de mesures d'urgences qui prévoient d'autres moyens pour alimenter en eau potable cet hôpital : mise en place de nouveaux chemins hydrauliques reliant le réservoir et l'hôpital en fermant certaines vannes, traitements supplémentaires de l'eau au niveau de l'hôpital même en cas de contamination, etc.

Un autre avantage de cette démarche est sa flexibilité. Cet aspect est directement lié à la multidisciplinarité. Si plusieurs municipalités ont du mal à pouvoir appliquer les méthodes actuelles de planification de réhabilitation de conduites qui nécessitent une bonne connaissance globale de leur réseau d'eau potable (données sur l'âge, les matériaux, les profondeurs d'assises, les types de poses, la corrosivité des sols, l'état des conduites, taux de bris, etc.), la démarche proposée permet d'obtenir une hiérarchisation des conduites en fonction principalement des données disponibles. En s'intéressant aux éléments de l'IE, à leurs niveaux d'importance pour l'IE, leurs localisations fixent le cadre de l'étude qui va s'appliquer depuis leurs entrées de services jusqu'aux réservoirs qui les desservent en eau potable. Le fait de prendre en compte des relations entre différents domaines (IE, égouts, topographie, etc.) et le réseau d'eau potable permet de trouver des critères de différenciation (par exemple, le potentiel des conduites à amener

des contaminants à l'hôpital H, la présence à proximité des conduites d'eau potable de conduites d'égoûts plus ou moins étanches, etc.) entres secteurs qui viennent « combler » jusqu'à un certain point le « manque de données propres au réseau d'eau potable ». Plutôt que de chercher à hiérarchiser la réhabilitation des conduites d'eau potable à partir seulement des données réseau, cette démarche propose d'obtenir une hiérarchisation basée à la fois sur le réseau d'eau potable avec les données utiles et disponibles, mais aussi sur les risques encourus par les Infrastructures Essentielles. Ainsi, considérant qu'obtenir des informations sur les IE est moins onéreux en temps et en argent, cette démarche s'avère judicieuse. Sur l'étude de l'hôpital H, il est apparu intéressant de prendre en compte le potentiel des conduites à amener des vagues de contaminants aux nœuds de l'hôpital H, en régime permanent. La prise en compte de ce critère a nécessité la modélisation informatique du réseau d'eau potable autour de l'hôpital H jusqu'aux réservoirs qui le desservent. Si cette modélisation n'avait pas été disponible, il aurait pu être décidé de s'en passer pour l'étude. Une hiérarchisation des conduites aurait quand même été obtenue basée sur les autres critères pris en compte ici (âge et matériaux des conduites d'eau potable, proximité et matériau des égouts), mais cette hiérarchisation aurait été moins complète. Cela amène un autre avantage lié à la flexibilité de la démarche : si des données sur le réseau d'eau potable étaient ou devenaient disponibles et pertinentes, il est tout à fait possible de les intégrer à la démarche et cela ne rendra l'étude que plus complète et précise. Ainsi, cette démarche peut véritablement s'adapter et s'appliquer dans de nombreuses municipalités.

Des avantages plus spécifiques à la démarche elle-même existent encore. Son application permet de réduire les risques de défaillances des IE à la suite du non-respect des missions réseau si des travaux sont entrepris sur les conduites des zones critiques. Le fait de partir des conséquences sur l'IE pour étudier le niveau de criticité des certaines conduites pour cette même IE permet de fixer un cadre d'étude précis. Les résultats obtenus sont spécifiques à l'IE et à la mission réseau étudiées et non généraux (le modèle Kanew donne des pourcentages de types de conduites à réhabiliter sur une

municipalité entière). Le fait de construire et de mettre en place des courbes de conséquences permet d'augmenter les connaissances des relations existantes au sein même de l'IE étudiée. Les relations d'interdépendances sont mieux senties. Une fois la chaîne des conséquences établie (niveau d'affectation de l'IE – personnel absent (malade) – niveau de contamination de l'eau potable – conduites d'eau « critiques » face à une contamination), il est également possible de la faire fonctionner ensuite dans le sens causal comme montré dans l'exemple de l'hôpital H. Enfin, si cette étude visait à établir la hiérarchisation des conduites d'eau potable en fonction de leurs criticités pour une IE, il peut également être choisi de s'intéresser à d'autres réseaux que celui étudié. Plutôt que de se concentrer à réhabiliter les conduites d'eau potable, pourquoi ne pas entreprendre des travaux visant à s'assurer de l'étanchéité des égouts dans les secteurs critiques.

Si cette démarche présente de nombreux avantages, certains avantages peuvent également présenter un aspect limitatif. La cartographie par exemple peut être très utile mais aussi limitative si elle est mal utilisée. Étant donné le but de la démarche qui est de hiérarchiser des conduites à réhabiliter, le recours à des cartes semble tout à fait pertinent. Les informations sur carte indiquant les conduites ou zones critiques doivent permettre une bonne synthèse visuelle des données. Cependant, il faut que ces cartes soient réalisées et interprétées correctement par les intervenants. Si elles permettent une bonne synthèse visuelle, les cartes ne peuvent retranscrire toutes les informations terrains pour permettre leur lisibilité. Il s'agit donc ici d'un bon outil de synthèse, mais sa construction et son utilisation doivent être menées avec précautions.

De même, si l'aspect multidisciplinaire est un avantage, il présente également quelques limites. En effet, il est probable que, dans certains cas, le fait de réunir plusieurs représentants de domaines différents peut générer certaines difficultés à trouver un accord commun. Parmi l'ensemble des critères obtenus lors de l'étude, des discussions doivent avoir lieu concernant les niveaux d'importance de chaque critère. Au cours de

ces discussions, la communication et l'écoute entre représentants seront les clés de leurs succès. Suivant les cas, plusieurs hiérarchisations différentes pourront être obtenues ; cette approche n'aboutit pas à une solution unique, plusieurs solutions seront valables. Il s'agira de sélectionner la hiérarchisation la plus « juste » aux yeux des intervenants.

L'application sur l'hôpital H a également donné quelques limites de la démarche. Il se peut que l'approche par conséquences ne puisse être menée de bout en bout. Ici, le logiciel EPANET ne permettait pas une utilisation telle que souhaitée initialement. Ce logiciel fonctionnant de manière causale (Si..., Alors...), il a fallu se résoudre à choisir des scénarios de causes. Dans d'autres cas, pour des raisons techniques, comme ici, il faudra trouver le moyen de continuer la chaîne de conséquences. Dans l'idéal, il serait très intéressant de modifier ces logiciels afin qu'ils permettent d'appliquer une approche par conséquences, à l'inverse de l'approche causale.

S'il paraît impossible de vouloir répondre à plusieurs problèmes de façon simultanée (différentes IE par rapport à plusieurs missions réseau d'eau potable), cette démarche propose de poser un cadre précis d'étude. Cela semble constituer le point primordial de la méthode dans le sens où cela nécessite de se poser les bonnes questions et y répondre. La remise en question de chaque étape de la démarche sur l'objectif fixé doit être réalisée afin de s'assurer que les données obtenues peuvent bien répondre à cette problématique. L'établissement de la chaîne de conséquences en dépend grandement. Cette remise en cause peut sembler être un poids pour la démarche mais c'est elle qui permet d'éviter toute erreur dans la construction de la chaîne de conséquences. Cet aspect se retrouve également lors des constructions des courbes de conséquences. Il s'agit là encore de se poser les bonnes questions en fonction de la problématique étudiée. Il faut savoir quoi chercher, s'interroger sur le but à atteindre. Cette remise en cause des étapes successives n'est pas un facteur limitatif de la méthode, mais plutôt un aspect qui nécessite une attention particulière afin de ne pas se fourvoyer par la suite.

Dans l'étude de l'hôpital H vis-à-vis de la mission Qualité du réseau, la première question soulevée était : comment un hôpital peut-il être affecté par un problème de qualité d'eau potable ? Ce problème étant très large, l'étude s'est recentrée sur le personnel de l'hôpital seulement. Puis, comment caractériser le niveau d'affectation de l'hôpital H en fonction de son personnel ? etc. C'est cette succession de questions et de remises en questions, qui permet véritablement de construire une chaîne de conséquences.

Enfin, un autre aspect qui, lui aussi peut sembler limitatif mais qui finalement est plus une contrainte qu'une limitation, est celui de n'étudier qu'une problématique à la fois. S'il est possible d'étudier plusieurs problématiques pour la même IE, il n'est pas très « rentable » de toutes les étudier. La constitution de ces chaînes de conséquences peut prendre un certain temps avant d'être élaborée et chaque étude ne peut pas être reproduite en totalité et de façon systématique pour différentes IE par exemple. Par conséquent, il est conseillé de faire des choix judicieux, aussi bien au niveau de la problématique à étudier que des critères à retenir.

Ainsi, si cette démarche possède quelques inconvénients, son application propose de nombreux avantages majeurs, notamment celui d'être adaptable à différentes municipalités, suivant leurs niveaux de connaissances propres de leurs infrastructures.

CHAPITRE 6 CONCLUSION

Cette étude a proposé une démarche d'analyse de risque visant à étudier les Infrastructures Essentielles (IE) d'une municipalité face aux défaillances éventuelles du réseau de distribution d'eau potable. Basée sur une approche par conséquences, elle permet d'obtenir une caractérisation des IE d'une ville vis-à-vis de leurs relations avec l'eau potable en général et permet de hiérarchiser des zones ou conduites d'eau potable à réhabiliter en fonction de leur criticité pour les IE. Pour cela, différentes étapes successives sont nécessaires :

- choisir une problématique : l'IE face à la mission réseau d'eau potable à étudier ;
- acquérir suffisamment de connaissances sur l'IE : décomposition en éléments et hiérarchisation de ces éléments ;
- évaluer la vulnérabilité des éléments de l'IE face à une défaillance de la mission réseau : constructions de courbes de conséquences ;
- identifier sur le réseau d'eau potable les sources et les phénomènes pouvant occasionner le non respect de la mission réseau étudiée ainsi que les facteurs externes pouvant y jouer un rôle : recherche à partir des niveaux de défaillances des éléments de l'IE ;
- hiérarchiser les zones de l'étude où des défaillances sur le réseau de conduites d'eau potable pourraient entraîner des dysfonctionnements dans les éléments de l'IE, soit dans l'IE elle-même.

L'utilisation par les municipalités d'une démarche de ce type leur permettrait de se doter d'un plan de réhabilitation qui tienne compte du risque encouru sur leurs IE à la suite de défaillances du réseau. Ainsi, une optimisation de la planification de la réhabilitation du réseau serait obtenue de manière à éviter les plus gros risques, notamment ceux liés aux défaillances du réseau engendrant des dysfonctionnements des IE.

De plus, l'application de cette démarche ne requiert que peu de données concernant le réseau d'eau potable, comparativement à d'autres méthodes de planifications de réhabilitation, vu qu'elle s'appuie sur des données de différentes natures, comme celles propres aux IE ou au milieu environnant des conduites d'eau potable. Ainsi, la diversité dans l'origine des données pour réaliser l'étude permet d'éviter aux municipalités d'engager des recherches trop poussées sur leurs systèmes d'aqueducs, ce qui se traduit par des gains financiers et de temps. La flexibilité de cette approche permet donc de guider à la fois les municipalités qui n'ont que peu de données sur leur réseau d'eau potable et évidemment, les autres.

Le fait que cette démarche soit multidisciplinaire permet également de ne pas se focaliser dans une direction particulière de réflexion. Au contraire, cette approche veut amener les différents parties en jeu à ouvrir de nouvelles voies de réflexions afin d'envisager tous types d'incidents.

Aussi, la mise en place de courbes de conséquences permet une véritable structuration de connaissances sur la vulnérabilité des IE face au réseau d'eau potable. La ville est ainsi plus à même de répondre rapidement à des situations d'urgences, ces situations ayant déjà été envisagées.

L'illustration proposée a montré jusqu'à quels niveaux de réflexions cette démarche pouvait conduire. Cet exemple a néanmoins dévoilé certaines limites à son application. Suivant les cas, des données ou des techniques seront indisponibles ou pas suffisamment précises comme pour les courbes dose-réponse. D'autres moyens devront alors être trouvés en attendant que des études soient réalisées pour survenir à ces manques. De plus, la multidisciplinarité, si elle est bien un point fort, peut constituer un obstacle étant donné qu'il est nécessaire de contacter des responsables en tout genre pour mener à bien l'étude. Néanmoins, une bonne stratégie de communication devrait permettre de surmonter ces difficultés.

Ainsi, cette démarche d'analyse de risque voit son utilité dans la planification de travaux de réhabilitations de conduites d'eau potable, planification basée principalement sur le facteur risque. Son application permettrait de passer d'une stratégie de réaction face aux défaillances du réseau, à une stratégie de prévention à court ou moyen terme. Il serait intéressant, par la suite, de jumeler cette approche avec des méthodes à plus long terme comme celle des courbes Nessie.

REFERENCES

- AINSWORTH, R. 2004. *Safe piped water: managing microbial water quality in piped distribution systems*. London, United Kingdom: World Health Organization (WHO) and International Water Association (IWA) Publishing. 168 p.
- ALLGEIER, S.C., MURRAY, R. 2005. "Contamination Warning Systems and the Response Protocol Toolbox - Contamination Warning Systems : Framing the Problem". *Water Quality Technology Conference (AWWA)*.
- American Water Works Association (AWWA). 2001. *Dawn of the replacement Era. Reinvesting in drinking water infrastructure*. Denver, Colorado, USA: 49 p.
- American Water Works Association (AWWA). 2002. *Deteriorating buried infrastructure management challenges and strategies*. 33 p.
- BARBEAU, B., PAYMENT, P., COALLIER, J., CLÉMENT, B., PRÉVOST, M. 2000. Evaluating the risk of infection from the presence of Giardia and Cryptosporidium in drinking water. *Quantitative Microbiology*. 2 : 1. 37-54.
- BARIBEAU, H., POZOS, N.L., BOULOS, L., CROZES, G.F., GAGNON, G.A., RUTLEDGE, S. *et al.* 2005. *Impact of changes in distribution system water quality on disinfection efficacy*. Denver, Colorado, USA: American Water Works Association Research Foundation and American Water Works Association. 282 p. 91094.
- BESNER, M.-C., CARTIER, C., PRÉVOST, M., LAVOIE, J., AUBIN, A., PAYMENT, P. *Water main repairs and their impact on water quality*. 2006. St-John, Nouveau-Brunswick, Canada, Canadian Water and Wastewater Association (CWWA) 12th Canadian National Conference and 3rd Policy Forum on Drinking Water.

BESNER, M.-C. 1999. *Influence des paramètres structurels et opérationnels sur la qualité de l'eau dans un réseau de distribution*. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal - Génies Civil, Géologique et des Mines.

BLANCHER, P. 1998. *Risques et réseaux techniques urbains*. Lyon: Collection du Certu.

CENTRE D'EXPERTISE ET DE RECHERCHE EN INFRASTRUCTURES URBAINES (CERIU). 2006. A propos du CERIU : la mission du CERIU. Site Internet du CERIU. <http://www.ceriu.qc.ca> (Page consultée le 28 Juin 2006)

Consortium SNC-Lavalin/Dessau-Soprin. 2002. *Étude comportant la collecte d'information et le portrait technique des infrastructures de la gestion publique de l'eau*. Montréal: Ville de Montréal.

CRITTENDEN, J.C., TRUSSELL, R.R., HAND, D.W., HOWE, K.J., TCHOBANOGLOUS, G. 2005. *Water treatment: principles and Design* (Second Edition). Anon. MWH, John Wiley and Sons, Inc. 1948.

CROMWELL, J., NESTEL, G., ALBANI, R., PARALEZ, L., DEB, A., GRABLUTZ, F. 2001. *Financial and economic optimization of water main replacement programs*. Denver, Colorado, USA: American Water Works Association Research Foundation and American Water Works Association. 172 p. 90821.

DEB, A.K. 2002. *Renewing the distribution system: new tools for managers*. American Water Works Association Research Foundation and American Water Works Association. 5 p.

DORÉ, M. 2004. "Définitions et caractéristiques du risque". *Acétates du cours IND 6126*. École Polytechnique de Montréal : Département de Mathématiques et de Génie Industriel.

EZELL, B.C. 2002. "Toward a systems-based vulnerability assessment methodology for water supply systems". Santa Barbara, California, USA : Risk-Based Decisionmaking in Water Resources X: Proceedings of the Tenth Conference. American Society of Civil Engineers. P. 91-103.

FORTIN, K. 2002. Bris d'aqueduc sur Pie IX - Les Montréalais sont appelés à réduire leur consommation d'eau. Site Internet du journal *Le Devoir* <http://www.ledevoir.com/2002/08/14/7113.html> (Page consultée le 28 Juin 2006)

GIBBS, S.G., MECKES, M.C., GREEN, C.F., SCARPINO, P.V. 2004. Evaluation of the ability of chlorine to inactivate selected organisms from the biofilm of a drinking water distribution system simulator following a long-term wastewater cross-connection. *Journal of Environmental Engineering and Science*. 3 : 97-105.

GRIGG, N.S. 2004. *Assessment and renewal of water distribution systems*. Denver, Colorado, USA: American Water Works Association Research Foundation and American Water Works Association. 129 p. 91025.

Groupe d'experts - Stratégie hydraulique, Ministère du Renouvellement de l'infrastructure publique de l'Ontario. 2005. *Rapport du groupe d'experts - stratégie hydraulique*. Toronto, Ontario, Canada: Publications Ontario. 96 p. 4046.

Guide National pour des Infrastructures Municipales Durables (InfraGuide). 2003. *Élaboration d'un plan de renouvellement de réseau de distribution d'eau (Version 1.0)*. 53 p. ISBN 1-897094-23-X.

HAAS, C.N., ROSE, J.B., GERBA, C.P. 1999. Anon. *Quantitative microbial risk assessment*. New York, USA : John Wiley and Sons. 464.

INFO BRANCHEZ-VOUS. 2002. Communiqué, Ville de Montréal - Bris d'aqueduc sur le boulevard Pie IX - les étapes de décontamination de la conduite commencent aujourd'hui. Site Internet de Info Branchez-vous. <http://info.branchez-vous.com/communiques/cnw/DIV/2002/08/c3125.html> (Page consultée le 28 June 2002)

INFRAGUIDE. 2006. A propos d'InfraGuide - Innovations et règles de l'art. Site Internet d'InfraGuide. <http://www.infraguide.ca> (Page consultée le 28 June 2006)

KARIM, M.R., ABBASZADEGAN, M., LECHEVALLIER, M. 2003. Potential for pathogen intrusion during pressure transients. *Journal of the American Water Works Association*. 95 : 5. 134-146.

KIRMEYER G.J., FRIEDMAN, M., MARTEL, K., HOWIE, D., LECHEVALLIER, M.W., ABBASZADEGAN, M. *et al.* 2001. *Pathogen intrusion into the distribution system*. Denver, Colorado, USA: American Water Works Association Research Foundation and American Water Works Association. 254 p. 3P-.25C-90835-7/20-CM.

LECHEVALLIER, M.W., GULLICK, R.W., KARIM, M.R., FRIEDMAN, M., FUNK, J.E. 2003. The potential for health risks from intrusion of contaminants into the distribution system from pressure transients. *Journal of Water and Health*. 1 : 1. 3-14.

LEMER, A.C. 2000. "Advancing infrastructure-asset management in the Gasb 34 age: who's driving the train?". APWA International Public Works Congress. NRCC/CPWA Seminar Series "Innovations in Urban Infrastructure".

MINISTÈRE DE LA SANTÉ ET DES SOLIDARITÉS, R.F. 2005. *Guide technique : Eau et Santé - L'eau dans les établissements de santé*.

Ministry of Public Infrastructure Renewal. 2004. *Building a better tomorrow: an infrastructure planning, financing and produrement framework for Ontario's public sector or its executive summary*. Toronto, Ontario, Canada: 7 p.

MINISTÈRE DE LA SÉCURITÉ PUBLIQUE ET DE LA PROTECTION CIVILE DU CANADA (MSPPCC). 2005. A propos des Infrastructures Essentielles-Secteur des Infrastructures Essentielles. Site internet du MSPPCC. <http://www.psepc-sppcc.gc.ca/prg/em/nciap/about-fr.asp#1> (Page consultée le 28 Juin 2006)

PAYMENT, P., RICHARDSON, L., SIEMIATYCKI, J., DEWAR, R., EDWARDES, M., FRANCO, E. 1991. A randomized trial to evaluate the risk of gastrointestinal disease due to consumption of drinking water meeting currentl microbiological standards. *American Journal of Public Health*. 81 : 6. 703-708.

PAYMENT, P., SIEMIATYCKI, J., RICHARDSON, L., RENAUD, G., FRANCO, E., PRÉVOST, M. 1997. A prospective epidemiological study of gastrointestinal health effects due to the consumption of drinking water. *International Journal of Environmental Health Research*. 7 : 1. 5-31.

PAYMENT, P. 1999. Poor efficacy of residual chlorine disinfectant in drinking water to inactivate waterborne pathogens in distribution systems. *Canadian Journal of Microbiology*. 45 : 8. 709-715.

PRIM - PORTAIL POUR LA PRÉVENTION DES RISQUES MAJEURS. 2006. Introduction aux risques – Définition générale du risque majeur. Site Internet de la Prévention des Risques Majeurs. http://www.prim.net/citoyen/definition_risque_majeur/definition.html (Page consultée le 3 Juillet 2006)

PROPATO, M., UBER, J.G. 2004. Vulnerability of water distribution systems to pathogen intrusion: how effective is a disinfectant residual? *Environmental Science and Technology*. 38 : 13. 3713-3722.

REASON, J. 2000. Human error : models and management. *British medical journal*. 320:768-770.

ROBERT, B. 2004. A method for the study of cascading effects within lifeline networks. *International Journal of Critical Infrastructures*. 1 : 1. 86-99.

ROBERT, B., PETIT, F. 2005. "Notions de vulnérabilité". *Acétates du cours IND 6126*. École Polytechnique de Montréal : Département de Mathématiques et de Génie Industriel.

ROBERT, B., PETIT, F., SENAY, M.H., R.-RIGAUT, M., SABOURIN, J.P. 2004. Montréal, Québec, Canada: École Polytechnique de Montréal-Centre de Développement Technologique (C.D.T.). 57 p. P2911.

ROBERT, B., SABOURIN, J.P., GLAUS, M., PETIT, F., SENAY, M.H. 2003. A new structural approach for the study of domino effects between life support networks (Chapter 17). *Building safer cities: the future of disaster risk*. Anonyme. Washington, DC, USA : The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank. P. 245-272.

ROBERT, B., SENAY, M.-H., PLAMONDON, M.-E., SABOURIN, J.-P. 2003. Ottawa, Ontario, Canada: Sécurité publique et Protection Civile Canada. Protection des infrastructures essentielles de Protection civile. 76 p. D82-88/2003F-PDF.

ROSSMAN, L.A. 2000. *EPANET 2 - Users manual*. Cincinnati: United States Environmental Protection Agency. 200 p.

SPELAY, K., SHARP, J. 2004. Deep water, low temperatures Hamper main break repair. *Opflow-American Water Works Association*. 30 : 7. 1-4.

TCHOBANOGLIOUS, G., BURTON, F.L., STENSEL, H.D. 2003. Wastewater Engineering . Anon. New York, USA : Metcalf and Eddy, Inc., McGraw Hill. 1819.

TERRY MARTIN, P.E. 2005. "Seattle Public Utilities - Asset Management - Sewer Pipe Risk Model". *2005 Pacific NorthWest Section - AWWA Conference*. Portland, OR : AWWA.

United States Environmental Protection Agency (USEPA). 2003. *Federal Register. Part I. Environmental Protection Agency. National primary drinking water regulations: long term 2 enhanced surface water treatment rule; proposed rule*. Washington, DC, USA.

United States Environmental Protection Agency (USEPA). 2005. *Evaluating HACCP strategies for distribution system monitoring hazard assessment and control*. Washington, DC, USA: 71 p.

VÉRIFICATEUR GÉNÉRAL DU QUÉBEC. 2005. *Rapport du Vérificateur général du Québec à l'Assemblée nationale, Faits saillants 2004-2005 Tome 1. Chapitre 2 : Service d'eau et pérenité des infrastructures*. Site Internet du Vérificateur général du Québec. <http://www.vgq.gouv.qc.ca> (Page consultée le 28 août 2006)

VILLE DE MONTRÉAL. 2006. Villeray St-Michel Parc-Extension - Services aux citoyens, Transports et Tavaux Publics. Site Internet de la Ville de Montréal. http://ville.montreal.qc.ca/portal/page?_pageid=91,1983736&_dad=portal&_schema=PORTAL (Page consultée le 07 Janvier 2006)

The White House Washington. 2003. *The national strategy for the physical protection of critical infrastructures and key assets*. Washington, DC, USA: 96 p.